В. С. Вуглинский

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ВОДНЫЙ БАЛАНС КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ СССР

ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1991

В 88

УДК 556.552

Рецензент С. К. Черкавский.
Ответственный редактор д-р геогр. наук К. К. Эдельштейн

В монографии даны основные сведения о крупных водохранилищах СССР. Приведены особенности водообмена в природно-техногенной системе речной бассейн — водохранилище.

Рассмотрены методические аспекты расчетов основных составляющих водного баланса водохранилищ и ряда гидрометеорологических элементов для водной поверхности, а также вопросы взаимосвязи компонентов водного баланса. Предложена трактовка понятия водных ресурсов. Выполнена количественная оценка водных ресурсов водохранилищ на современном этапе и в перспективе до 2000 г.

Предложены методы оценки влияния водохранилищ на водные ресурсы рек, на основании которых получены данные об изменениях речного стока под влиянием крупных водохранилищ.

Книга рассчитана на гидрологов, географов, специалистов водного хозяйства, гидротехников имеющих дело с проектированием крупных водохранилищ. Она может быть использована также студентами географических факультетов университетов и гидрометеорологических ВУЗов.

The monograph „**Water Resources and Water Balance of the USSR Large Reservoirs**" by V. S. Vuglinsky gives the main information on large reservoirs of the USSR. Peculiarities of water exchange in rivers basin — reservoir system are presented.

The main methodological aspects for the computation of the main water balance components of reservoirs and a number of hydrometeorological components for water surface are considered as well as the problems of water balance components interaction. A definition of water resources is proposed. A quantitative assessment is made on the water resources of reservoirs for the present and for the future before 2000.

Methodology is proposed to evaluate the effect of reservoirs on the water resources of rivers, where data are available on river runoff changes under the effect of large reservoirs.

The book is intended for hydrologists, geographers, specialists in water management, hydraulic engineers dealing with large water projects with the construction of large reservoirs. It may be also used by the students of Geographical faculties in universities and hydrometeorological institutes.

359730

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
п-д 195196 Малоохтинский пр. 98

В $\frac{1805040700\text{-}083}{069(02)\text{-}91}$ 18—91

© В. С. Вуглинский, 1991 г.

ISBN 5—286—00604—3

ПРЕДИСЛОВИЕ

Несмотря на уже многолетнюю историю создания водохранилищ их водный режим, баланс и воздействие на окружающую среду изучены все еще недостаточно. Об этом свидетельствуют просчеты, допускаемые при их проектировании и строительстве, нередко приводящие к ухудшению экологической обстановки на прилегающих территориях и экологических показателей самой водной среды.

Коренная перестройка естественного гидрологического цикла в речном бассейне в результате создания крупных водохранилищ, по своим размерам часто не уступающих крупнейшим озерам страны, приводит к формированию совершенно новых природно-техногенных систем речной бассейн—водохранилище, изучение которых представляет большой научный интерес и имеет важное практическое значение для решения проблемы рационального использования и охраны водных ресурсов.

Особый интерес представляют крупные водохранилища, объемом более 1 км^3, создание которых приводит к наиболее ощутимым изменениям различных компонентов природной среды, в том числе и процессов водообмена на окружающих территориях. Наиболее полное представление об особенностях водообмена крупных водохранилищ с окружающей природной средой можно получить при рассмотрении всех трех аспектов такого взаимодействия: особенностей водного баланса водохранилищ, закономерностей формирования и использования их водных ресурсов и влияния водохранилищ на речной сток. Именно с этих позиций в настоящей монографии рассмотрены особенности водообмена крупных водохранилищ СССР.

В целях более полного раскрытия темы автор счел необходимым включить в монографию обобщенные сведения о существующих и планируемых к строительству крупных водохранилищах СССР, высказать свою точку зрения по ряду дискуссионных вопросов, касающихся понятия «водные ресурсы» и существующих подходов к учету колебаний речного стока при планировании выработки электроэнергии на ГЭС; рассмотреть методические вопросы, связанные с расчетом ряда элементов гидрометеорологического режима при оценках водного баланса водохранилищ. Насколько это удалось — судить читателям.

Автор приносит глубокую благодарность научному редактору монографии доктору географических наук К. К. Эдельштейну, внимательно просмотревшему рукопись и сделавшему ряд весьма ценных замечаний и предложений по ее улучшению.

ЧАСТЬ I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ СССР. ВОДОХРАНИЛИЩЕ И РЕЧНОЙ БАССЕЙН

ГЛАВА 1. КРУПНЫЕ ВОДОХРАНИЛИЩА СССР. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ИХ ВОДООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДОЙ

Создание водохранилищ является одним из самых эффективных способов решения водных проблем не только в пределах отдельных локальных водохозяйственных систем или небольших административно-хозяйственных единиц, но и в пределах крупных территориально-промышленных комплексов и в бассейнах крупнейших рек СССР. Как известно, основная цель создания крупных водохранилищ многолетнего и сезонного регулирования с гидрологической точки зрения — устранение природной неравномерности в многолетнем и внутригодовом распределении речного стока в интересах наиболее рационального его использования. В СССР строительство водохранилищ началось уже в первые годы советской власти. Это было связано с реализацией ленинского плана электрификации России ГОЭЛРО. В соответствии с этим планом в 20—30-х годах были созданы водохранилища при Волховской, Нижне-Свирской и Днепровской ГЭС. К началу второй мировой войны в СССР было построено в общей сложности более 300 водохранилищ, в том числе 10 наиболее крупных, объемом более 1 млрд м^3.

Однако темпы строительства водохранилищ СССР в довоенный период были невысокими. После войны интенсивность строительства водохранилищ в СССР, особенно энергетического и оросительного назначения, резко возросла, что было вызвано ростом энергетических мощностей государства и освоением крупных орошаемых массивов в южных районах страны.

В 1945—1960 гг. в СССР было построено свыше 150 водохранилищ объемом более 10 млн м^3, в том числе 16 водохранилищ объемом более 1 км^3 каждое. По своему назначению водохранилища существенно различались между собой. Небольшие водохранилища предназначались, как правило, для решения одной или двух-трех задач. Так, в районах орошаемого земледелия (бассейны рек Днестра, Дона, Волги, Куры, Сырдарьи и Амударьи) малые водохранилища создавали в основном для нужд орошения, решая попутно задачи гидроэнергетики и рыбного хозяйства. На северо-западе европейской части СССР водохранилища предназначались для выработки гидроэлектроэнергии, решения задач судоходства, лесосплава и рыбного хозяйства. К этому периоду относится начало строительства водохранилищ в Сибири. Первые небольшие водохранилища, созданные в бассейнах Оби и Енисея,

удовлетворяли нужды промышленности, сельского хозяйства и гидроэнергетики. Большинство крупных водохранилищ, построенных в этот период, имели комплексное назначение. Каховское водохранилище на Днепре, Цимлянское на Дону, Мингечаурское на Куре помимо основной задачи — удовлетворения нужд орошаемого земледелия и выработки электроэнергии обеспечивают потребности водного транспорта и рыбного хозяйства, промышленности, коммунального хозяйства и рекреации. Горьковское, Куйбышевское и Волгоградское водохранилища на Волге, Иркутское водохранилище на Ангаре, Новосибирское на Оби, созданные в основном для выработки электроэнергии, предназначены также для удовлетворения нужд судоходства, коммунального хозяйства, водного транспорта, рекреационных и других целей.

Период 1961—1985 гг. — это период дальнейшего роста темпов строительства водохранилищ в СССР. Общий объем водохранилищ увеличился за указанное 25-летие более чем на 450 км^3, а площадь водной поверхности возросла более чем на 30 тыс. км^2. В этот период было завершено создание каскадов водохранилищ на Волге и Днепре, были сооружены крупнейшие водохранилища Сибири и Дальнего Востока, имеющие комплексное назначение, — Красноярское, Усть-Илимское, Саяно-Шушенское, Хантайское, Зейское и Вилюйское. В настоящее время суммарный полный объем водохранилищ СССР (без учета объема оз. Байкал) составляет около 1025 км^3 (более 20 % суммарного среднегодового стока рек СССР). Полезный объем водохранилищ СССР составляет более 450 км^3, суммарная площадь водной поверхности водохранилищ при НПУ превышает 100 тыс. км^2 (10 % суммарной площади водной поверхности озер СССР). Наибольшее число водохранилищ построено в СССР для целей орошения. В основном это водохранилища малые, как по объему, так и по площади водной поверхности. Вместе с тем 93 % полного, 81 % суммарного полезного объема и более 80 % площади водной поверхности приходится на водохранилища гидроэлектростанций, к числу которых принадлежат 20 крупнейших водохранилищ СССР с полным объемом более 10 км^3 каждое. В настоящее время многие водохранилища входят в состав крупных водохозяйственных систем страны, являясь неотъемлемой частью водохозяйственного комплекса СССР.

1.1. Общие сведения о крупных водохранилищах СССР

Число эксплуатируемых и строящихся водохранилищ в СССР, в том числе водохранилищ, образованных вследствие подпора озер, а также малых водохранилищ в настоящее время превышает 10 тыс. Точную цифру назвать трудно из-за весьма приближенного учета небольших водохранилищ, имеющих сугубо локальное значение. Последние сооружают практически повсеместно в целях наиболее оптимального использования речного стока в интересах отдельных водопользователей. Наиболее полные учетные данные имеются о водохранилищах СССР объемом более 1 млн м^3

каждое. Согласно технической паспортизации водохранилищ СССР, выполненной ЦНИИКИВРом в 1985—1987 гг. на основании обобщения данных каталогов водопользования в рамках ведения кадастра использования водных ресурсов [73], в СССР к началу 1986 г. было более 3900 таких водохранилищ (табл. 1.1). Наибольшее число водоранилищ (2227) сосредоточено в РСФСР. Второе

Таблица 1.1

Результаты технической паспортизации водохранилищ объемом более 1 млн м³ (по данным ЦНИИКИВРа)

Градация объема водохранилищ, млн м³	Число водохранилищ	Суммарный объем, млн м³		Площадь водной поверхности при НПУ, км²
		полный	полезный	
1—10	3 267	8 192	6 510	3 467
10—100	454	14 865	9 316	4 127
100—1 000	139	42 887	27 946	7 720
> 1 000	59	958 511	413 284	83 468
Всего	3 919	1 024 455	457 056	98 782

место по числу водохранилищ (968) занимает Украина. Значительно меньше водохранилищ в Казахстане (197), Белоруссии (125) и Литве (109). В остальных республиках существует по нескольку десятков водохранилищ объемом более 1 млн м³ каждое (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Распределение водохранилищ объемом более 1 млн м³ по республикам

Республика	Число водохранилищ	Суммарный объем, млн м³		Площадь зеркала при НПУ, км²
		полный	полезный	
РСФСР	2 227	801 393	334 143	74 548
Украина	968	54 543	26 113	9 522
Белоруссия	125	2 945	1 145	796
Узбекистан	36	9 331	8 244	488
Казахстан	197	92 100	48 742	9 858
Грузия	28	1 528	1 095	122
Азербайджан	40	18 452	10 547	842
Литва	109	1 737	404	309
Молдова	72	1 658	859	240
Латвия	32	2 067	311	362
Киргизия	23	21 454	15 502	387
Таджикистан	8	14 468	7 402	707
Армения	29	1 077	948	97
Туркмения	15	1 622	1 553	481
Эстония	10	80	48	23

Можно выделить несколько крупных регионов, в пределах которых сосредоточено наибольшее число водохранилищ. В европейской части СССР это Карелия, Поволжье и ЦЧО; в азиат-

ской — юг Восточной Сибири и Средняя Азия. В табл. 1.3 приведено распределение водохранилищ по бассейнам крупных рек СССР по результатам паспортизации водохранилищ, выполненной ЦНИИКИВРом.

Таблица 1.3

Распределение водохранилищ полным объемом более 1 млн м³ по бассейнам крупных рек СССР

Бассейн реки	Бассейн моря (озера)	Число водохранилищ в бассейне реки	Суммарный объем, млн м³		Площадь зеркала при НПУ, км²
			полный	полезный	
Дон	Азовское	647	31 426	15 467	6 016
Кубань	»	57	4 382	3 438	690
Миус	»	29	125	109	27
Амударья	Аральское	34	15 749	9 217	328
Сырдарья	»	31	35 467	26 885	2 052
Неман	Балтийское	105	1 860	632	354
Западная Двина	»	43	3 651	573	704
Онега	»	15	2 909	1 578	1 002
Волга	Каспийское	807	190 083	90 630	27 208
Урал	»	91	4 948	4 190	661
Кура	»	78	20 303	12 127	994
Терек	»	22	805	741	220
Енисей	Карское	39	368 767	117 337	12 889
Обь	»	266	64 844	39 998	7 983
Лена	Лаптевых	12	36 201	18 014	2 214
Амур	Охотское	37	68 759	32 307	2 508
Днепр	Черное	648	47 409	21 087	8 170
Южный Буг	»	177	802	623	294
Днестр	»	84	3 685	2 481	361
Дунай	»	72	2 999	1 335	862
Или	оз. Балхаш	31	28 344	6 827	1 871

Особый интерес представляют крупные водохранилища с полным объемом более 1 км³ или площадью водного зеркала более 100 км². Именно эта категория водохранилищ в значительной мере определяет соответствующие суммарные показатели по водохранилищам СССР. Крупные водохранилища вызывают существенные изменения водообмена в бассейнах рек, на которых они созданы, приводят к ощутимому снижению речного стока за счет дополнительных потерь на испарение с водной поверхности (см. гл. 2 и 9). Особенно большие изменения в гидрологический режим водотоков вносят каскады водохранилищ, созданные на Волге, Днепре и Енисее. Самым большим объемом обладает Братское водохранилище (169 км³), а по площади водной поверхности крупнейшим (не считая озер-водохранилищ Байкала и Онежского) является Куйбышевское (6450 км²).

С гидрологической точки зрения наибольший интерес представляют речные водохранилища. Во-первых, в силу особого гидрологического режима этих искусственных водных объектов, созданных посредством затопления больших площадей суши. И, во-вторых, вследствие их существенного воздействия на гидрологические

особенности водотока, на котором они созданы. Наливные водохранилища также представляют интерес с гидрологической точки зрения, так как являются вновь созданными объектами, отличающимися особым водным режимом. Что касается озерных водохранилищ, созданных вследствие подпора озер и предназначенных в основном для целей гидроэнергетики, судоходства и лесосплава, то для них характерны небольшие изменения основных гидрологических параметров по сравнению с естественным состоянием.

Таблица 1.4

Число водохранилищ различных типов объемом более 1 млн м³ (знаменатель — процент общего числа водохранилищ)

Градация объема водохранилищ, млн м³	Число водохранилищ	Число водохранилищ по типам		
		речные	наливные	озерные
1—10	3267	2786/85	410/13	71/2
10—100	454	311/69	83/18	60/13
100—1000	139	92/66	16/12	31/22
> 1000	59	46/78	1/2	12/23
Всего	3919	3235/83	510/13	174/4

В табл. 1.4 приведены количественные данные о различных типах водохранилищ объемом более 1 млн м³. Для всех четырех указанных в таблице градаций водохранилищ характерна высокая (70—80 %) доля речных водохранилищ. Водохранилищ наливного и озерного типа значительно меньше (10—20 %).

Таблица 1.5

Распределение по республикам водохранилищ различных типов объемом более 1 млн м³

Республика	Число водохранилищ по типам			Всего
	речные	наливные	озерные	
РСФСР	1916	239	72	2227
Украина	854	107	7	968
Белоруссия	65	44	16	125
Узбекистан	18	18	—	36
Казахстан	170	26	1	197
Грузия	15	10	3	28
Азербайджан	19	21	—	40
Литва	65	—	44	109
Молдова	59	13	—	72
Латвия	6	—	26	32
Киргизия	10	13	—	23
Таджикистан	6	2	—	8
Армения	23	6	—	29
Туркмения	5	10	—	15
Эстония	4	1	5	10
Всего	3235	510	174	3919

Распределение водохранилищ различных типов по республикам приведено в табл. 1.5. Вполне естественно, что озерные водохранилища характерны в основном для районов избыточного увлажнения — Прибалтики, Белоруссии, Северо-Запада РСФСР. Наливные водохранилища характерны для южных засушливых территорий Средней Азии, Молдавии и Закавказья. Велика доля таких водохранилищ также на Украине и в Казахстане. Вместе с тем, для всех республик, кроме Латвии, Эстонии, Киргизии, Узбекистана и Туркмении, характерно преобладание числа речных водохранилищ над числом водохранилищ других типов.

1.2. Состояние изученности водообмена крупных водохранилищ с окружающей природной средой

С возникновением на территории СССР первых крупных водохранилищ в 40—50-х годах начали развиваться исследования, связанные с изучением отдельных элементов их водообмена с окружающей сушей. Этому способствовала организация на крупных водохранилищах специализированных гидрометеорологических обсерваторий (ГМО). Первая ГМО была открыта в 1944 г. на Рыбинском водохранилище. В настоящее время на крупных водохранилищах действуют 11 специализированных ГМО, которые выполняют широкий комплекс стандартных и специальных наблюдений за элементами влагооборота, а также проводят научно-исследовательские работы в целях совершенствования методов расчета и прогноза различных гидрометеорологических характеристик применительно к конкретным водоемам. На основании обобщения накопленных материалов в 75—85-х годах были изданы первые тома региональных справочников-монографий по гидрометеорологическому режиму крупных водохранилищ Волжского и Днепровского каскадов, а также Братского, Иркутского и Цимлянского водохранилищ. Подготовка подобных изданий в серии «Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ» продолжается и в настоящее время. Указанные материалы регулярных гидрометеорологических наблюдений, выполняемых рядом ГМО уже в течение 30—35 лет, являются основным источником сведений об элементах водообмена крупных водохранилищ, а результаты научных исследований позволили создать серию региональных расчетных методик по определению отдельных элементов водного баланса крупных водохранилищ.

Наряду с использованием для решения рассматриваемой задачи материалов стандартных наблюдений, элементы водообмена изучают при организации кратковременных полевых изысканий на стадии проектирования водохранилищ, а также при проведении комплексных экспедиционных исследований на отдельных водохранилищах страны. В общем плане проблема взаимодействия водохранилищ с окружающей природной средой и вопросы их водообмена рассмотрены в работах А. Б. Авакяна [1],

Б. Б. Богословского [22], С. Л. Вендрова и К. Л. Дьяконова [46], Ю. М. Матарзина [106, 107] и В. М. Широкова [159]. Наибольшие успехи достигнуты в изучении основных элементов водного баланса крупных водохранилищ: притока, осадков, стока и испарения для конкретных водохранилищ. На основании использования непосредственных данных наблюдений за стоком и осадками, а также различных расчетных методик при определении испарения и ряда других элементов, рассчитаны водные балансы отдельных крупных водохранилищ СССР как за многолетний период, так и за конкретные годы. Следует отметить, что уже более 30 лет органы Госкомгидромета СССР составляют текущие водные балансы крупных озер и водохранилищ СССР за декаду, месяц и год. К началу 1988 г. такие расчеты выполнены для многих водохранилищ СССР. Результаты научных проработок по водному балансу отдельных водохранилищ приведены также в справочниках-монографиях серии «Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ», а также в трудах В. Г. Булата [41], Р. И. Геты [66], А. М. Кабрановой [88], С. Д. Рубан [129] и др. Так как водохранилища вступали в строй неодновременно, то и накопленные к настоящему времени ряды воднобалансовых данных имеют различную продолжительность. Наиболее полная сводка данных о многолетних годовых водных балансах водохранилищ СССР и методах расчета отдельных их составляющих дана в монографии З. А. Викулиной [52], в которой на основании обобщения большого числа литературных источников приведены сведения о водных балансах 29 крупных водохранилищ СССР по 1975 г. включительно. К настоящему времени объем информации о водном балансе водохранилищ значительно возрос. Более полные данные об элементах водного баланса получены по тем водохранилищам, которые изучают на озерных станциях и в ГМО Госкомгидромета СССР. Тем не менее, состояние знаний об основных составляющих водного баланса далеко неравнозначно. Наиболее надежно можно определить два элемента водного баланса крупных водохранилищ — сток через подпорное сооружение и осадки. Как известно, сток из водохранилища подсчитывают по эксплуатационным характеристикам турбин (при наличии ГЭС) или по пропускной способности водосбросных отверстий, что обеспечивает достаточную надежность получаемых данных (погрешность подсчета стока в большинстве случаев не выходит за пределы $\pm 5\ \%$).

Существующая сеть осадкомерных пунктов на многих крупных водохранилищах СССР позволяет определять месячные суммы осадков в пунктах наблюдений с погрешностью $\pm (15...20)\ \%$. Вместе с тем, как показали работы Э. Г. Богдановой, А. П. Бочкова, В. С. Голубева и Л. Р. Струзера [21, 27, 69, 140], измеренные суммы осадков не характеризуют их реальные значения в месте установки прибора. При воднобалансовых исследованиях в измеренные значения осадков необходимо вводить поправки на смачивание осадкомерного сосуда, испарение из него и на ветровой недоучет. Хотя в настоящее время предложен целый ряд

методик корректировки измеренных значений осадков путем введения соответствующих поправок [36, 56, 110, 149], единой общепринятой расчетной схемы до сих пор нет. Наряду с проблемой определения «истинных» значений осадков применительно к крупным водоемам до сих пор обсуждается вопрос о том, можно ли использовать данные береговых осадкомерных пунктов для определения осадков, выпадающих на акваторию водоема. Большинство исследователей считают, что над акваториями крупных равнинных озер, таких как Ладожское, Онежское, Чудско-Псковское, Ильмень, Великие американские озера, осадков выпадает на 10—15 % меньше, чем на берегу [52, 155, 182, 189]. Вместе с тем, в последние годы появились публикации, свидетельствующие о том, что данная закономерность не подтверждается для ряда крупных озер и водохранилищ, расположенных в предгорьях, из-за специфических условий формирования осадков в их береговой зоне, связанных с орографическими особенностями местности [116]. Установлено отсутствие эффекта уменьшения осадков над акваторией и для ряда крупных водохранилищ степной зоны европейской части СССР [93, 94]. Таким образом, данный вопрос нуждается в дополнительном рассмотрении.

Весьма немногочисленны работы в области оценки влияния водохранилищ на режим осадков прилегающей территории. Полученные данные свидетельствуют о том, что создание водохранилища не приводит к сколько-нибудь существенным изменениям годовых сумм осадков в его береговой зоне. Месячные суммы осадков могут увеличиться в том случае, когда осадкомерный пункт после создания водохранилища окажется на его наветренном берегу [46, 47]. Не решен до конца вопрос оценки среднего значения осадков для крупных водоемов. Несмотря на целый ряд существующих способов такого осреднения для многих крупных озер и водохранилищ предгорной и особенно горной зон эта проблема по-прежнему актуальна.

Основная сложность при определении поверхностного притока к крупным водохранилищам связана с тем, что значительная часть их водосбора (20—30 %), как правило, не изучена в гидрометрическом отношении, что требует применения косвенных приемов расчета стока с этих площадей. До недавнего времени с этой целью применяли метод аналогии, который обладает значительной субъективностью. В последние годы эту задачу решают с использованием современных статистических методов, таких, как методы последовательной комплексной регрессии, разложения поля стока на естественные ортогональные составляющие и метод интегрального осреднения функции, описывающей поверхность стока [14]. Однако эти методы только входят в практику расчета притока воды в крупные водохранилища и нуждаются в тщательной апробации и совершенствовании применительно к рассматриваемой задаче. Наиболее обстоятельные исследования по оценке испарения с водной поверхности водоемов, в том числе и с водохранилищ, выполнены Б. Д. Зайковым [84], А. П. Браславским и

З. А. Викулиной [33], В. С. Голубевым [70], А. Р. Константиновым [97] и В. И. Кузнецовым [103]. В настоящее время в зависимости от наличия исходной информации и продолжительности расчетного периода применяют различные подходы при оценке испарения с водоемов: методы теплового баланса и турбулентной диффузии, эмпирические формулы, а также методики пересчета показаний испарительных приборов на реальный водоем. Несмотря на различие существующих подходов к оценке испарения погрешности определения этого элемента баланса для месячных интервалов времени достаточно велики и в большинстве случаев составляют $\pm(20...25)\%$. Наряду с разработкой новых подходов к оценке испарения с водной поверхности (например, применение молекулярно-кинетической теории [10]) требуется дальнейшее усовершенствование способов пересчета показаний испарительных приборов на реальный водоем. Наиболее разработана методика перехода от континентального испарителя ГГИ-3000 к испарительному бассейну площадью 20 м^2, расположенному на суше. В то же время методическим вопросам перехода от показаний этих приборов к водоему уделено мало внимания.

Еще одна проблема связана с необходимостью во многих случаях при расчете испарения определить ряд гидрометеорологических элементов для водной поверхности. Основными из них являются скорость ветра, температура воды и парциальное давление водяного пара. Существующая схема определения скорости ветра над водоемом по показаниям флюгера, расположенного на берегу [150], значительно субъективна и может приводить к существенным погрешностям, достигающим ± 2 м/с и более. Вопрос о разработке простых и достаточно надежных расчетных методик в этой области остается открытым. Что касается расчета температуры воды, то существующая теплобалансовая методика применительно к речным водохранилищам, обладающим значительной проточностью, нуждается в уточнении за счет учета горизонтальной составляющей водообмена. При определении парциального давления водяного пара над водоемом по данным континентальных метеостанций весьма трудоемкой является процедура определения средней длины разгона воздушного потока над водной поверхностью.

Следует подчеркнуть, что многие используемые в настоящее время методические приемы определения испарения и сопутствующих гидрометеорологических элементов для водной поверхности проверены в основном на примере крупных и средних озер или водохранилищ озерного типа. Речные водохранилища, обладающие специфическими особенностями формирования потоков тепла и влаги над водной поверхностью, используют для этой цели значительно реже. Вместе с тем, именно оценки испарения с крупных речных водохранилищ наиболее значимы, так как их широко используют в практике проектирования и эксплуатации водохранилищ.

Вопросам подземного водообмена крупных водохранилищ с окружающей территорией посвящено много работ. Теоретические аспекты динамики подземных вод в береговой зоне водохранилищ рассмотрены в трудах Н. Н. Биндемана [19], Ф. М. Бочевера [25, 26], Н. Н. Веригина [49], И. В. Гармонова [63, 64], В. С. Завилейского [81, 82], А. Г. Емельянова [78, 79] и Г. А. Разумова [123]. К настоящему времени получены аналитические решения для разнообразных случаев формирования подземного водообмена вблизи водохранилищ. Однако для их практической реализации при оценке количественных показателей водообмена подземных вод в береговой зоне крупных водохранилищ нужна разнообразная исходная информация, которая в реальных условиях в большинстве случаев отсутствует. Для ее получения необходимо проводить детальные полевые работы в районе водохранилища, которые отличаются значительной трудоемкостью, требуют больших затрат времени и средств. Об этом красноречиво свидетельствует опыт постановки такого рода исследований И. В. Гармоновым [120] на ряде водохранилищ Волжского и Днепровского каскадов в целях оценки фильтрационных потерь в дно и берега водохранилищ. В широком масштабе проводить такие исследования невозможно, поэтому с начала массового строительства крупных водохранилищ в 60-х годах гидрогеологи пытаются разработать более простые подходы к оценке подземной составляющей водообмена водохранилища с окружающей сушей. Специальная работа в этом плане была выполнена в ленинградском отделении Гидропроекта им. С. Я. Жука под руководством Г. А. Михайловой и завершена в 1980 г. подготовкой типового альбома характерных схем распространения подпора подземных вод в береговой зоне водохранилищ, составленного на основании обобщения большого количества натурных материалов по многим водохранилищам СССР. Определенные перспективы в плане создания расчетных схем, требующих минимума исходной информации, связаны с моделированием режима подземных вод на электроаналоговых моделях. Один из таких подходов рассмотрен в настоящей работе.

Следует отметить также, что до сих пор нет однозначного решения вопроса об увязке водного баланса водохранилища с учетом погрешностей определения отдельных элементов баланса.

Краткий анализ современного состояния воднобалансовых исследований крупных водохранилищ позволяет представить себе уровень изученности лишь одного, хотя и весьма важного, звена водообмена водохранилища с окружающей территорией, а именно: характерных количественных соотношений потоков влаги через поверхность водохранилища и его котловину с учетом притока и оттока воды. Наряду с этим в последние годы немаловажное значение уделено вопросам изучения особенностей притока воды в водохранилища, обеспечения оптимального режима регулирования речного стока, выявления закономерностей смены воды в них в зависимости от соотношения объемов речного стока и водохранилища. Данные аспекты связаны с особенностями водообмена

в системе река—водохранилище, где важную роль играет фактор искусственного регулирования стока. До недавнего времени этим вопросам не уделяли должного внимания. Впервые закономерности многолетних колебаний притока воды к крупным водохранилищам были исследованы в 1982 г. на примере отдельных водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада. Данная работа была выполнена в ГГИ в целях выяснения причин критической сработки запасов воды в ряде сибирских водохранилищ, что привело к значительным народнохозяйственным ущербам из-за снижения выработки электроэнергии на ГЭС. Результаты выполненных исследований позволили установить наиболее вероятную продолжительность отдельных характерных фаз водности притока (маловодной, средней по водности и многоводной), а также дать вероятностный прогноз водности притока к Ангарскому каскаду водохранилищ на ближайшие годы. Итоги этих исследований частично опубликованы в работе [13].

В 1984—1985 гг. ГГИ была выполнена работа по оценке многолетних характеристик притока воды к водохранилищам крупных ГЭС СССР, завершившаяся подготовкой соответствующего справочника [113]. В нем приведены данные о среднемесячном, квартальном и годовом притоке различной обеспеченности к 56 крупным водохранилищам. Одновременно были исследованы закономерности притока воды к указанным водохранилищам в годы различной водности, оценены вероятность повторяемости группировок лет определенной водности и их продолжительность, а также вероятности смены различных категорий водности притока [12]. Обеспечение наиболее рационального регулирования речного стока связано с изучением опыта эксплуатации существующих водохранилищ, в частности с установлением оптимальных соотношений между притоком воды в них и изменениями объема их водной массы за год (для водохранилищ многолетнего регулирования) и месяц (для водохранилищ сезонного регулирования). Такие исследования в ограниченном объеме были выполнены для ряда водохранилищ Сибири и Казахстана. Необходимо, чтобы эти работы охватывали не только крупные единичные водохранилища, но и их каскады на Волге и Днепре.

Одним из важных направлений исследований является изучение внешнего водообмена водохранилищ. Этому вопросу посвящены работы Н. В. Буторина [42], Г. П. Калинина [89], А. В. Караушева [91], Ю. М. Матарзина [107], В. М. Широкова [159], М. А. Фортунатова [153] и К. К. Эдельштейна [167]. В. Н. Штефаном [160, 161] предложено общее выражение показателя водообмена водохранилища, позволяющее однозначно определять среднюю интенсивность водообмена в любую фазу режима. Для модели водоема-смесителя получено выражение для определения коэффициента водообновления, который входит в расчетные формулы по оценке качества воды и самоочищающей способности водохранилищ [162]. Для отдельных водохранилищ выполнены оценки показателей водообмена и водообновления. Однако дан-

ных по сравнительному анализу характера внешнего водообмена крупных водохранилищ весьма мало.

Третье характерное направление исследований связано с изучением особенностей водообмена в системе водохранилище—прилегающая суша. В гл. 2 и 8 показано, что при создании речных водохранилищ существенно изменяются элементы водообмена в зонах затопления и подтопления, а также в прирусловой зоне реки ниже подпорного сооружения и в дельтовой области. Эти изменения в целом приводят к снижению водных ресурсов реки при создании водохранилища. Проблема влияния водохранилищ на речной сток рассмотрена в работах А. М. Алмазова [5], В. Г. Андреянова и Г. С. Семеновой [8], В. Г. Булата [41], В. А. Вейнерт и Л. В. Магдалюк [44], Д. В. Коренистова [99], С. М. Перехреста [121], С. И. Руденко [130], А. А. Соколова [138]. Наиболее обстоятельное исследование этой проблемы выполнено И. А. Шикломановым и Г. М. Веретенниковой в работе [158], в которой предложена методика оценки годовых изменений стока под влиянием водохранилищ, выполнены расчеты влияния водохранилищ Волжско-Камского и Днепровского каскадов на сток Волги и Днепра и даны оценки изменений стока основных рек СССР под влиянием водохранилищ на уровень 1980 г. и на перспективу до 2000 г. Вместе с тем, общеметодологические вопросы оценки влияния водохранилищ на водные ресурсы рек полностью не решены. В дальнейшем совершенствовании нуждается методика оценки изменений стока под влиянием водохранилищ. Существует острая необходимость в совершенствовании методических приемов оценки потерь стока при проектировании водохранилищ.

1.3. Классификация водохранилищ

К настоящему времени предложено достаточно много классификаций водохранилищ по различным признакам. В данной работе рассмотрены только те классификации, которые прямо или косвенно отражают особенности гидрологического режима водохранилищ. Что касается других классификаций (по гидрохимическому и гидробиологическому режимам, гидроэнергетическим показателям, характеру использования и др.), они здесь не рассмотрены, хотя в литературе описаны достаточно подробно [2, 4, 54, 153].

При рассмотрении вопросов водного баланса и водных ресурсов водохранилищ и их влияния на речной сток в настоящей монографии использована классфикация водохранилищ по их происхождению. По этому признаку выделяют три наиболее характерных типа водохранилищ: речные водохранилища, создаваемые в долинах рек; озерные водохранилища, создаваемые вследствие подпора уровня озер, и наливные водохранилища, возникновение которых связано с заполнением обособленной котловины специально отводимыми сюда речными водами. Наиболее распространенными в СССР являются речные водохранилища.

Согласно А. Б. Авакяну [2], кроме указанных типов можно выделить подземные и морские водохранилища, а также водохранилища-коллекторы сбросных вод.

Наиболее часто водохранилища классифицируют по конфигурации, морфометрическим показателям, характеру регулирования стока и характеру водообмена. Далее рассмотрены классификации именно по этим признакам. Воднобалансовые классификации водохранилищ приведены в п. 5.4.

По конфигурации водохранилища классифицировать довольно трудно, так как они могут иметь самую причудливую форму и очертания. Кроме того, конфигурация водохранилищ меняется при изменении уровня воды в них. В связи с последним обстоятельством, в большинстве предложенных классификаций рассмотрена конфигурация водохранилищ при НПУ. Наиболее детальной в настоящее время является классификация М. А. Фортунатова, который предложил выделять четыре типа водохранилищ: пойменные, долинные, озеровидные и водохранилища сложной конфигурации. Отдельные типы водохранилищ, в свою очередь, подразделены по форме на несколько подгрупп [153]. Следует отметить, что выделение отдельных типов водохранилищ у Фортунатова носит чисто описательный характер без каких-либо количественных критериев.

На использовании отдельных внешних признаков без количественных показателей основаны и другие классификации водохранилищ по их конфигурации, предложенные в разное время И. А. Лифановым (озеровидные, речные и сложной формы), В. И. Надиным (русловые и озеровидные), А. Б. Авакяном и В. А. Шараповым (речные и озерно-речные). По существу все эти авторы различают в зависимости от конфигурации два основных типа водохранилищ — русловые и озеровидные. Иногда выделяют также промежуточный тип водохранилищ.

В данной работе предложено выделять по конфигурации три типа водохранилищ: продолговатые, округлые и сложной формы. Продолговатые водохранилища характеризуются вытянутой формой и соответствуют условию $L > 5B$, где L — длина водохранилища, B — его средняя ширина. Округлые водохранилища имеют круглую или эллипсовидную форму при условии $L \leqslant 5B$. Водохранилища сложной формы в отличие от двух предыдущих типов имеют причудливые в плане очертания, часто с чередованием отдельных сужений и расширений. Согласно этой классификации, округлую конфигурацию имеют Кумское ($L/B = 3$), Сегозерское ($L/B = 3$), Рыбинское ($L/B = 2{,}8$) и Кайраккумское ($L/B = 5$) водохранилища; продолговатую — большинство водохранилищ, созданных в долинах рек. Сложную конфигурацию имеют Камское, Братское, Вилюйское и Каттакурганское водохранилища. Предложенная классификация близка классификации И. А. Лифанова. Однако у последнего отсутствуют количественные критерии.

Классификации водохранилищ по морфометрическим признакам были предложены в работах М. А. Фортунатова

[152], А. Б. Авакяна и В. А. Шарапова [3]. А. И. Макарова и В. А. Вейнерт [105], К. К. Эдельштейна [164]. Наиболее удачная классификация водохранилищ по объему и площади водной поверхности предложена А. Б. Авакяном и В. А. Шараповым в работе [3]. Данная классификация основана на анализе размеров большого числа водохранилищ земного шара и является достаточно детальной (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Классификация водохранилищ по размерам [3]

Категория водохранилищ	Полный объем, км³	Площадь водного зеркала, км²
Крупнейшие	> 50	> 5000
Очень крупные	50—10	5000—500
Крупные	10—1	500—100
Средние	1—0,1	100—20
Небольшие	0,1—0,01	20—2
Малые	< 0,01	< 2

Наиболее полную классификацию по морфологии ложа водохранилища предложил К. К. Эдельштейн. Он выделил три типа водохранилищ — долинные, котловинные и смешанного типа. Долинные водохранилища подразделяются на три подтипа — русловые, пойменно-долинные и котловинно-долинные; котловинные — на озерно-котловинные, депрессионные и котлованные. Кроме того, он подразделяет водохранилища каждого из перечисленных подтипов на морфологически простые и морфологически сложные [168].

353730

По характеру регулирования стока различают водохранилища многолетнего, сезонного, недельного и суточного регулирования. Эта классификация общепризнана и нашла широкое применение. Считают, что в целях осуществления многолетнего регулирования достаточно, чтобы полезный объем водохранилища составлял 20—25 % годового стока реки, а для сезонного регулирования — 8—20 % [1]. Однако на практике эти соотношения не соблюдаются (табл. 1.7). Это связано с тем, что при определении полезного объема водохранилища учитывают в основном не только необходимость обеспечения определенного вида регулирования. На первый план выходят требования отдельных отраслей, участвующих в эксплуатации водохранилища: гидроэнергетики, орошения, коммунального и промышленного водоснабжения, водного транспорта, рыбного хозяйства. Нередко водохранилища многолетнего регулирования имеют полезный объем, превышающий среднегодовой сток в створе плотины (Зейское, Ириклинское, Пролетарское, Токтогульское), а водохранилища сезонного регулирования имеют полезный объем, часто достигающий 40 % годового стока реки в створе гидротехнического сооружения.

Ленинградский Гидрометеор...

Таблица 1.7

Соотношения между полезным объемом водохранилищ ($W_п$) и годовым стоком в створе плотины ($Q_п$) для различных типов регулирования стока

Водохранилище	Река	$W_п$ км³	$Q_п$ км³	$\beta = \frac{W_п}{Q_п}$ %
	Многолетнее регулирование			
Андижанское	Карадарья	1,8	3,8	47
Братское	Ангара	48,2	91,0	53
Бухтарминское	Иртыш	30,8	17,2	>100
Веселовское	Западный Маныч	0,06	0,2	30
Вилюйское	Вилюй	17,8	18,0	99
Зейское	Зея	32,1	23,4	>100
Ириклинское	Урал	2,8	1,3	>100
Капчагайское	Или	6,6	11,8	56
Мингечаурское	Кура	0,8	11,6	71
Пролетарское	Западный Маныч	8,2	0,2	>100
Рыбинское	Шексна	16,7	30,1	55
Токтогульское	Нарын	14,0	11,4	>100
Хантайское	Хантайка	12,8	17,7	72
Цимлянское	Дон	11,5	17,6	65
	Сезонное регулирование			
Горьковское	Волга	2,8	46,8	6
Днестровское	Днестр	2,0	8,1	25
Иваньковское	Волга	0,8	9,2	9
Камское	Кама	9,2	53,0	17
Кайраккумское	Сырдарья	2,6	15,2	17
Каховское	Днепр	6,8	47,1	14
Киевское	Днепр	1,2	34,3	3
Костешты-Стынка	Прут	0,6	2,4	25
Краснодарское	Кубань	2,2	13,6	16
Красноярское	Енисей	30,4	86,5	35
Кременчугское	Днепр	9,1	44,6	20
Куйбышевское	Волга	34,6	234,9	15
Павловское	Уфа	1,0	10,2	10
Усть-Илимское	Ангара	2,7	100,6	3
Чарвакское	Чирчик	1,6	6,0	27
Чардаринское	Сырдарья	4,7	13,5	35
Чебоксарское	Волга	2,5	109,5	2
Шекснинское	Шексна	1,9	4,8	40

Примечание. Значения полезного объема водохранилищ приняты по данным Справочника водохранилищ СССР, ч. 1. Водохранилища объемом 10 млн. м³ и более. Москва: изд. Союзводпроекта, 1988.

При каскадном расположении водохранилищ складывается особый режим регулирования стока, так как чем ниже расположено водохранилище в каскаде, тем больше эффект регулирования стока за счет увеличения числа вышележащих водохранилищ.

По характеру водообмена, согласно ГОСТу 17.1.1.02-77, различают водохранилища с замедленным ($K < 0{,}1$), умеренным ($0{,}1 < K < 5{,}0$) и интенсивным ($K > 5{,}0$) водообменом. Коэффициент K характеризует в данном случае относительный объем водохранилища, т. е. отношение объема стока воды через гидроузел в средний по водности год к полному объему водохранилища.

Более детальная классификация водохранилищ по водообмену приведена в монографии [54]. Она основана на анализе данных по водообмену более чем 150 водохранилищ СССР и США. В. Н. Штефан (см. п. 1.2) предложил общее выражение показателя водообмена, позволяющее однозначно определять среднюю интенсивность водообмена в любую фазу водного режима. В. Н. Штефан и К. К. Эдельштейн предложили также методику определения коэффициента водообновления, характеризующего фактическое время полной смены воды в водохранилище. Более детально показатели водообмена крупных водохранилищ рассмотрены в гл. 7.

ГЛАВА 2. ВОДОХРАНИЛИЩЕ И РЕЧНОЙ БАССЕЙН. ОСОБЕННОСТИ ВОДООБМЕНА В СИСТЕМЕ РЕЧНОЙ БАССЕЙН — ВОДОХРАНИЛИЩЕ

2.1. Природно-техногенная система речной бассейн — водохранилище

Создание водохранилищ — наиболее активная форма регулирования распределения во времени речного стока в интересах различных отраслей народного хозяйства. По своей сути водохранилища являются гидрологическими объектами, созданными руками человека. Тщательное изучение гидрологических особенностей водохранилищ позволяет наиболее оптимально использовать их водные ресурсы в интересах народного хозяйства. Как водный объект в составе природного комплекса водохранилище возникает внезапно. Даже крупнейшие водохранилища объемом более 1 км^3 заполняются, как правило, в течение сравнительно короткого для природных образований периода (за 2—3 года). Этим водохранилища существенно отличаются от озер (исключая завальные озера), которые развиваются в течение десятков и сотен тысяч лет. В процессе длительного взаимодействия с окружающей природной средой озеро приобретает характерные черты гидрологического режима, которые наилучшим образом соответствуют природным условиям окружающей территории. Водохранилища, как новые антропогенные водные объекты, возникающие сравнительно быстро (с гидрологической точки зрения) и не прошедшие периода эволюционного развития в составе единого природного комплекса речного бассейна, вступают в интенсивное взаимодействие с окружающей их природной средой.

С одной стороны, они определенным образом воздействуют на гидрологические условия прилегающей территории. Их создание приводит к затоплениям больших площадей суши, подтоплению прибрежных земель, пополнению запасов подземных вод в береговой зоне и другим явлениям и процессам, которые вызывают

изменения как общих водных ресурсов речного бассейна, так и гидрологического режима водотока ниже створа подпорного сооружения. С другой стороны, гидрологический режим самого водохранилища теснейшим образом связан с гидрометеорологическими условиями окружающей его территории. Именно последние определяют основные воднобалансовые соотношения, свойственные водохранилищу, а также наиболее оптимальный режим регулирования речного стока. Таким образом, комплекс водохранилище—речной бассейн представляет собой определенную природно-техногенную систему, в пределах которой водообмен формируется в результате сложного совместного взаимодействия антропогенного объекта — водохранилища и природного объекта — речного бассейна.

Масштаб взаимного влияния этих объектов зависит от их размеров, географического положения, типа водохранилища и места его расположения в гидрографической сети. Количественные данные о соотношениях основных элементов гидрологического цикла в пределах указанной природно-техногенной системы в зависимости от показателя удельного водосбора и географического положения рассматриваемых объектов приведены далее.

Водохранилища увеличивают «озерность» речного бассейна, т. е. площадь, занятую водной поверхностью. Доля площади крупных одиночных водохранилищ речного типа в общей площади бассейна составляет, как правило, 1—3 % (см. п. 5). Для Волжско-Камского и Днепровского каскадов водохранилищ данное соотношение составляет 1,5—2,0 %, для Ангарского (без оз. Байкал) — 1 %. Для крупных озерных водохранилищ доля площади водной поверхности в общей площади бассейна несколько выше и может составлять 4—10 % и более. Однако создание таких водохранилищ не приводит к существенному изменению водообмена в системе водохранилище—речной бассейн. Это связано с тем, что водохранилища указанного типа создаются за счет незначительного подпора уровня озер, при этом форма, основные морфометрические параметры и гидрологические особенности таких водохранилищ и озер мало различаются.

Так, например, после создания Верхне-Свирского водохранилища площадь водной поверхности Онежского озера возросла до 9930 км², т. е. на 2 %, а подъем среднегодового уровня составил 30 см. При сооружении Иркутского водохранилища площадь оз. Байкал увеличилась на 1465 км² (на 5 %). Такой же порядок цифр характерен для крупных озерных водохранилищ Карелии и Кольского полуострова (Имандровское водохранилище — площадь оз. Имандра увеличилась на 8 %, Юшкозерское водохранилище[1] — площадь оз. Юшкозера — на 11 %, Водлозерское водохранилище — площадь оз. Водлозеро — на 15 %). В тех случаях,

[1] Водохранилище создано на р. Кеми в результате подъема уровня воды в озерах Верхнее, Среднее и Нижнее Куйто из-за подпора плотиной Юшкозерской ГЭС.

когда озерные водохранилища создаются путем слияния двух и более озер, указанные соотношения могут быть выше (при создании Топо-Пяозерского водохранилища площадь водной поверхности увеличилась на 45 %, Выгозерско-Ондского — на 50 %, а Иовского — более чем в 2 раза). Однако даже при таком увеличении площадей гидрологические особенности вновь образованных озерных водохранилищ мало отличаются от тех, которые были присущи озерам до поднятия их уровня [91], а влияние таких водохранилищ на водные ресурсы рек крайне незначительно (см. п. 8.1).

Далее рассмотрены основные элементы влагообмена природно-техногенной системы и их соотношения, определяющие водные ресурсы и водный баланс водохранилища, а также изменения водных ресурсов рек, связанные с его созданием и эксплуатацией в бассейне реки.

2.2. Основные элементы водообмена в речном бассейне. Водные ресурсы рек в районах интенсивного строительства водохранилищ

Характер влагооборота в пределах речного бассейна зависит, с одной стороны, от количества влаги, поступающей извне, а с другой — от физико-географических особенностей самого бассейна (географическое положение, рельеф, почвогрунты, растительность и др.), которые в конечном итоге определяют присущие данному бассейну соотношения между отдельными составляющими водообмена. При однонаправленном изменении какого-либо элемента водообмена вследствие естественных или антропогенных причин перестраиваются количественные соотношения между составляющими гидрологического цикла речного бассейна и формируются новые соотношения, соответствующие изменившимся условиям влагооборота. В этом смысле речной бассейн правомерно рассматривать как саморегулирующуюся природную систему. Эту мысль неоднократно высказывал один из крупнейших специалистов в области воднобалансовых исследований В. Г. Андреянов [6].

Количественные соотношения между отдельными составляющими водообмена в речном бассейне устанавливают путем решения уравнения водного баланса, которое для естественных условий может иметь следующий вид [11]:

$$P - Q - E + \Delta W_{\text{п. з}} + \Delta W_{\text{з. а}} + \Delta W_{\text{г. в}} + s = 0, \qquad (2.1)$$

где P — осадки, выпавшие на поверхность бассейна; Q — речной сток; E — суммарное испарение с бассейна; $\Delta W_{\text{п. з}}$ — изменение запасов влаги на поверхности бассейна; $\Delta W_{\text{з. а}}$ — то же в зоне аэрации; $\Delta W_{\text{г. в}}$ — изменение запаса грунтовых вод; s — невязка уравнения водного баланса.

В том случае, когда в пределах речного бассейна интенсивно развивается хозяйственная деятельность, в уравнение (2.1) необходимо вводить дополнительные члены, характеризующие

антропогенные составляющие влагооборота. Закономерности изменения элементов водного баланса речных водосборов под влиянием хозяйственной деятельности рассмотрены в работах многих авторов. Их детальный обзор дан в монографии И. А. Шикломанова [156]. Он предложил все факторы хозяйственной деятельности, оказывающие влияние на элементы влагообмена в речном бассейне, подразделять на три группы:

1) факторы, действующие в русловой сети и перераспределяющие сток во времени и по территории;

2) факторы, действующие на обширных площадях бассейна и изменяющие соотношения между элементами водного баланса;

3) смешанные факторы, действующие как в руслах, так и на водосборе и обусловливающие перераспределение стока и преобразование элементов водного баланса.

Водохранилища отнесены к факторам первой группы, которые действуют в основном в русловой сети и приводят к перераспределению речного стока во времени. Действительно, основное назначение водохранилищ — регулирование речного стока и именно эта составляющая уравнения водного баланса (2.1) больше всего изменяется как в годовом (при многолетнем регулировании), так и во внутригодовом (при сезонном, недельном и суточном регулировании) разрезах.

Однако само по себе перераспределение стока во времени не может привести к изменению средних многолетних годовых значений стока. Вместе с тем известно, что создание водохранилищ, тем не менее, приводит к общему снижению речного стока [158]. Это происходит за счет изменения сложившихся соотношений между элементами водного баланса в пределах отдельных зон бассейна, подверженных воздействию водохранилища. Можно выделить три характерные зоны, в каждой из которых происходят такие изменения: зону затопления, зону подтопления от водохранилища и прирусловую зону реки ниже створа подпорного сооружения (включая дельтовую область), в пределах которой изменяются условия затопления в результате регулирования стока (рис. 2.1).

После создания водохранилища водообмен в пределах указанных зон изменяется, что в конечном итоге приводит к общему снижению водных ресурсов в бассейне реки. На всей остальной территории речного бассейна значимых изменений водообмена не происходит. Лишь в сравнительно узкой прибрежной зоне крупных водохранилищ долинного типа, ширина которой, согласно С. Л. Вендрову [46], теоретически может достигать 30—45 км, возможны некоторые изменения ряда гидрометеорологических элементов — температуры и влажности воздуха, скорости ветра и осадков.[1] К сожалению, количественные данные об изменениях

[1] Вопросы изменения микроклимата в прибрежной зоне водохранилищ и влияние водохранилищ на изменение ледово-термического и гидрохимического режимов реки не рассмотрены, так как это не входит в задачу работы.

осадков в прибрежной зоне различных водохранилищ СССР в настоящее время почти полностью отсутствуют. Можно указать на работу И. В. Колобова [93], который пришел к выводу о том, что создание Куйбышевского водохранилища не оказало существенного влияния на режим осадков в прибрежной зоне.

Вопрос о влиянии водохранилищ на режим осадков в прибрежной зоне рассмотрен на примере Волгоградского водохранилища речного типа, расположенного в степной зоне СССР, а также на

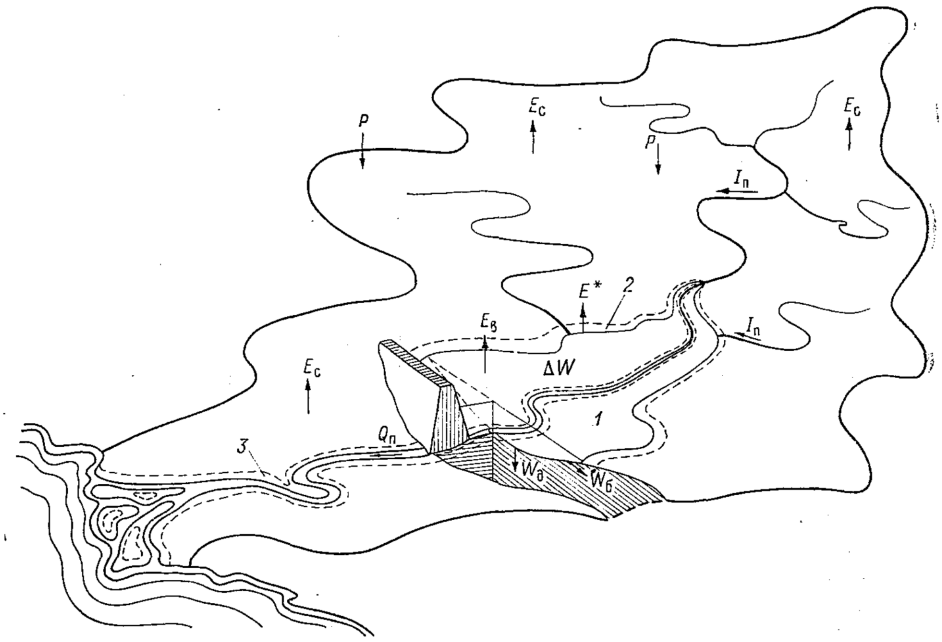


Рис. 2.1. Характерные зоны речного бассейна, в пределах которых изменяются элементы водообмена при создании водохранилища.

1 — зона затопления, *2* — зона подтопления, *3* — прирусловая зона реки ниже створа подпорного сооружения.

примере Каттакурганского и Чардаринского водохранилищ озерного типа, расположенных в полупустынной зоне. Для решения поставленной задачи были сопоставлены суммы осадков, определенные за периоды до и после создания водохранилищ. В качестве опорных пунктов наблюдений за осадками, на которых не сказывается влияние водохранилищ, были приняты метеостанции Самарканд (в 66 км от Каттакурганского водохранилища), Байркум (в 70 км от Чардаринского водохранилища) и Иловля (в 45 км от Волгоградского водохранилища). В соответствии с существующими представлениями ширина прибрежной зоны, в пределах которой водохранилище еще может влиять на элементы гидрометеорологического режима, колеблется в пределах 30—40 км [47, 94].

Таблица 2.1

Изменение средних значений осадков за период после строительства водохранилища по сравнению с периодом до его создания (числитель — миллиметры, знаменатель — проценты)

Водохранилище	Пункт наблюдений	Сравниваемый период		I	II	III	IV	V	VI	VII
		до создания водохранилища	после создания водохранилища							
Каттакурганское	г. Каттакурган	1920—37	1955—75	1/30	−8/−19	6/8	9/14	−1/−3	1/20	0/0
Волгоградское	п. Дубовка	1941—57	1961—75	6/33	0/0	−3/13	1/5	15/48	7/29	16/59
Чардаринское	с. Чардара	1937—64	1968—74	−5/−19	3/11	10/27	2/6	0/0	5/71	1/50

Водохранилище	Пункт наблюдений	Сравниваемый период		VIII	IX	X	XI	XII	Год
		до создания водохранилища	после создания водохранилища						
Каттакурганское	г. Каттакурган	1920—37	1955—75	0/0	0/0	0/0	3/10	0/0	11/3
Волгоградское	п. Дубовка	1941—57	1961—75	2/6	3/15	3/10	11/46	−4/−22	57/20
Чардаринское	с. Чардара	1937—64	1968—74	0/0	0/0	0/0	4/19	5/19	25/10

Каждой выбранной опорной станции соответствовала станция, которая после создания водохранилища оказалась в его прибрежной зоне. Был выполнен анализ средних многолетних месячных и годовых сумм осадков за периоды до и после создания водохрани-

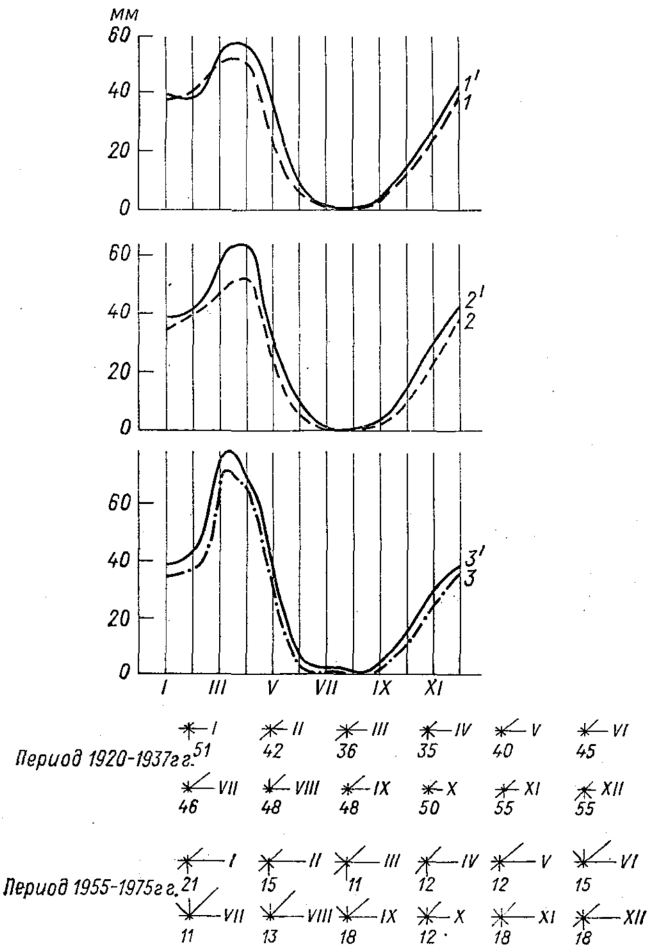


Рис. 2.2. Хронологические графики хода среднемесячных значений осадков по станциям Каттакурган (*1—3*) и Самарканд (*1'—3'*) и розы ветров по ст. Каттакурган.

1 и *1'* — средние многолетние данные; *2*, *3* и *2'*, *3'* — периоды до и после создания водохранилища соответственно; цифры у роз ветров — число суток со штилем, %.

лищ для каждой пары станций. Полученные результаты приведены в табл. 2.1 и частично на рис. 2.2. Ряды среднемесячных и среднегодовых значений осадков за оба периода прошли статистическую проверку и оказались однородными. Надежность полученных значений изменений годовых сумм осадков за рассматри-

ваемые периоды ($\Delta P_г$) проверены с использованием зависимости

$$|\Delta P_г| \geqslant 2\sigma_{\Delta P_г}, \qquad (2.2)$$

где $\sigma_{\Delta P_г}$ — среднеквадратическая погрешность расчета значений $\Delta P_г$, которую определяли по выражению

$$\sigma_{\Delta P_г} = \sqrt{(\sigma^2_{P_в} + \sigma^2_{P_и})/n}, \qquad (2.3)$$

где $\sigma_{P_в}$ и $\sigma_{P_и}$ — среднеквадратические погрешности восстановленных и измеренных значений осадков за период после создания водохранилища соответственно.

Результаты проверки по условию (2.2) подтвердили надежность расчетов при принятом уровне доверительной вероятности $p = 95\ \%$.

Для того чтобы оценить, как изменился ветровой режим с созданием водохранилищ и какую роль сыграл ветер в формировании осадков до и после их строительства, были построены розы ветров и рассчитаны повторяемости отдельных направлений ветров для двух пар станций, выбранных в районе Каттакурганского и Чардаринского водохранилищ. Наибольший интерес представляло изменение ветрового режима в районе метеостанций, которые после строительства водохранилищ оказались в их прибрежной зоне. В табл. 2.2 приведены сведения о повторяемости ветров, имевших направление от водохранилищ в сторону прибрежных метеостанций (в том числе и за период до создания водохранилищ). Анализ всех этих материалов позволил сделать следующие основные выводы.

1. Создание этих водохранилищ не привело к существенному изменению сезонных и годовых сумм осадков в прибрежной зоне по сравнению с естественными условиями. Для Каттакурганского и Чардаринского водохранилищ изменения годовых значений оказались не более 10 %, для Волгоградского — составили 20 %.

2. С созданием водохранилищ режим месячных сумм осадков для станций, расположенных в прибрежной зоне, существенно изменился для тех месяцев, в течение которых ветры, дующие с водохранилища, стали играть заметную роль среди ветров других направлений.

Месячное увеличение осадков после создания водохранилища может достигать 10—15 мм. В процентном отношении это увеличение может составлять 50 % и более, особенно для засушливых месяцев с малым количеством осадков.

3. После создания водохранилищ заметно изменился режим ветра на прибрежных станциях: существенно увеличилось число случаев, когда ветры дули с водохранилища. Кроме того, на прибрежных станциях резко сократилось число случаев затишья (в 2—3 раза).

Возвращаясь к рассмотрению особенностей системы водохранилище — речной бассейн, надо подчеркнуть, что влагооборот изме-

Таблица 2.2

Повторяемость ветров, дующих с водохранилищ в направлении прибрежной метеостанции по месяцам, %

Пункт наблюдений	Период наблюдений	Направление ветра	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
г. Каттакурган	1920—37	Ю	9	5	8	9	6	3	0	1	3	3	5	7
		ЮЗ	8	11	12	8	6	3	1	1	3	5	8	8
	1955—75	Ю	12	12	12	13	9	6	2	2	5	10	10	11
		ЮЗ	12	12	15	15	9	5	2	2	5	10	12	12
г. Самарканд	1920—37	Ю	5	8	7	7	4	4	1	1	2	5	4	6
		ЮЗ	9	12	13	11	6	4	2	2	5	8	8	9
	1955—75	Ю	4	5	6	5	4	2	1	0	1	3	5	4
		ЮЗ	9	10	12	12	6	5	2	2	4	7	8	8
с. Чардара	1937—64	ЮВ	10	11	10	9	9	7	3	2	3	5	7	9
		Ю	24	19	15	14	13	9	6	4	7	13	16	18
	1968—74	ЮВ	19	24	21	19	24	17	15	12	18	18	20	16
		Ю	5	4	7	12	10	7	6	4	6	6	4	5
п. Байркум	1937—64	ЮВ	5	6	5	7	6	4	3	2	2	4	7	6
		Ю	21	17	14	15	14	8	5	5	9	13	15	18
	1968—74	ЮВ	7	7	6	8	8	4	4	2	4	4	7	8
		Ю	22	16	13	14	11	6	6	3	8	14	15	12

няется в пределах трех рассмотренных характерных зон. С практической точки зрения, наиболее важно оценить, как эти изменения влияют на речной сток. Именно оценки возможных изменений речного стока обязательны при проектировании крупных водохранилищ на реках СССР [131].

С этой точки зрения, немаловажным является вопрос о том, насколько обеспечены водными ресурсами те регионы страны, в которых интенсивно строят и эксплуатируют водохранилища. Данные табл. 1.3 свидетельствуют о том, что в европейской части СССР наибольшее число водохраилищ объемом более 1 млн м^3 сосредоточено в бассейнах рек Волги, Днепра, Дона, Южного Буга, Днестра и Кубани. В азиатской части наибольшее число водохранилищ эксплуатируют в бассейнах Оби, Енисея, Амура, а также Амударьи и Сырдарьи. Среди указанных речных бассейнов высокой водностью отличаются водосборы рек Сибири и Дальнего Востока — Енисея, Амура, Оби, суммарный среднегодовой сток которых превышает 1370 км^3. Влияние хозяйственной деятельности на сток этих рек крайне незначительно. Существующие оценки свидетельствуют о том, что антропогенное снижение стока этих рек в современных условиях составляет 1—2 % нормы [156]. Другие рассматриваемые бассейны расположены преимущественно в зоне недостаточного увлажнения, где удельные показатели речного стока намного ниже среднего по стране. Водные ресурсы этих бассейнов интенсивно используют в народном хозяйстве. Достаточно отметить, что в среднем в 1982—1986 гг. ежегодные безвозвратные потери в бассейне Волги составили 8 % среднегодового стока реки, в бассейнах Днепра — 20 %, Дона — 20, Южного Буга — 19, Днестра — 11, Куры — 25, Кубани — 30, Амударьи — 40 и Сырдарьи — 45.

Учитывая, что наиболее массовое строительство водохранилищ в СССР в прошлые годы осуществлено именно в этих бассейнах, где ощутим дефицит водных ресурсов, дальнейшее их строительство может привести к еще большему снижению речного стока. Именно поэтому новые крупные водохранилища в СССР проектируют в основном в Сибири, в бассейнах многоводных сибирских рек Лены, Енисея и Амура.

2.3. Водообмен водохранилища с окружающей природной средой

На разных стадиях создания и эксплуатации водохранилища соотношения между отдельными элементами водообмена могут быть различными. В период заполнения водохранилища по мере увеличения его объема и площади водной поверхности элементы водообмена изменяются наиболее интенсивно. При нормальной эксплуатации водохранилища формируются уже достаточно устойчивые соотношения между элементами гидрологического цикла, свойственные тому или иному водохранилищу. Хотя и в этот период режим отдельных элементов может значительно изменяться.

Как известно, уравнение водного баланса водоема в общем виде чаще всего выглядит так [52]:

$$I_{\text{п}} + I_{\text{г}} + P - E_{\text{в}} - Q_{\text{п}} - Q_{\text{г}} + \Delta W_{\text{п}} + s = 0, \qquad (2.4)$$

где $I_{\text{п}}$ — поверхностный приток, $I_{\text{г}}$ — приток подземных вод, P — осадки на поверхность водоема, $E_{\text{в}}$ — испарение с водной поверхности, $Q_{\text{п}}$ — поверхностный сток, $Q_{\text{г}}$ — подземный отток, $\Delta W_{\text{п}}$ — изменение объема воды в водоеме за расчетный интервал времени, s — невязка уравнения водного баланса.

Рассматривая структуру уравнения применительно к водохранилищам, надо обратить внимание на следующую его особенность. Наличие составляющих $I_{\text{г}}$ и $Q_{\text{г}}$ предполагает существование однонаправленных потоков грунтовых вод либо к водоему, либо от него. Для озер, в береговой зоне которых подземные воды имеют установившийся режим, такое положение действительно существует. И поэтому не вызывают возражения данные о средних многолетних годовых значениях притока или оттока подземных вод, полученные разными авторами для ряда озер СССР. Однако применительно к водохранилищам нельзя вести речь о средних многолетних значениях указанных составляющих, как это нередко допускают при расчетах их водных балансов. Как известно, при заполнении водохранилищ уровни воды в них постоянно растут. В период нормальной эксплуатации уровенный режим водохранилищ также нестабилен: как внутри года, так и в многолетнем разрезе уровенная поверхность водохранилищ значительно колеблется. Особенно это характерно для крупных водохранилищ многолетнего и сезонного регулирования. С изменением положения уровенной поверхности теснейшим образом связан режим подземных вод. В одних случаях фильтрация из водохранилища будет преобладать над притоком подземных вод, в других — может иметь место обратный процесс. Анализ имеющихся данных о динамике подземных вод в береговой зоне водохранилищ приводит к тому, что при расчете подземных компонентов водного баланса водохранилищ необходимо выделять несколько периодов, соответствующих следующим трем характерным фазам формирования режима подземных вод в районе водохранилища: фазе заполнения водохранилища, когда происходит интенсивная фильтрация в дно и берега водохранилища; фазе начала эксплуатации водохранилища, в течение которой стабилизируется движение фильтрационных и грунтовых вод; фазе нормальной эксплуатации водохранилища в условиях установившегося режима грунтовых вод в его береговой зоне (см. п. 3.3.1).

Таким образом, на различных этапах существования водохранилища значения подземного водообмена могут иметь разные знаки. Поэтому нельзя говорить о средних многолетних значениях данной составляющей, как это нередко бывает при расчетах водных балансов водохранилищ. Можно говорить лишь об интегральном ее значении за рассматриваемый период, который может включать в себя годы как с положительной, так и с отрицательной

результирующей подземного водообмена. Поэтому более правильно уравнение водного баланса водохранилища записывать в следующем виде:

$$I_{\text{п}} + P - E_{\text{в}} - Q_{\text{п}} + \Delta W_{\text{п}} + \Delta W_{\text{г}} + s = 0, \qquad (2.5)$$

где $\Delta W_{\text{г}}$ — подземный водообмен между водохранилищем и его береговой зоной.

Более подробно особенности подземного водообмена в береговой зоне водохранилища рассмотрены в п. 3.3.

Сопоставление уравнений (2.1) и (2.5) показывает, что по своей структуре они похожи. Три элемента — осадки, испарение и сток представлены в обоих уравнениях. Ряд других элементов характеризует изменения запасов воды как в речном бассейне ($\Delta W_{\text{п. з}}$, $\Delta W_{\text{з. а}}$, $\Delta W_{\text{г. в}}$), так и в водохранилище ($\Delta W_{\text{п}}$). Но поскольку в отличие от замкнутого речного бассейна водохранилище имеет водообмен с окружающей территорией, в уравнение (2.5) включены два дополнительных члена — поверхностный приток к водохранилищу ($I_{\text{п}}$) и подземный водообмен через его контур ($\Delta W_{\text{г}}$).

Совершенно очевидно, что наибольшая «перестройка» водобалансовых соотношений при создании водохранилища происходит в пределах зоны затопления, где вместо бывшей суши появляется водоем со специфическими чертами водного режима. Две другие зоны, о которых шла речь в предыдущем пункте, испытывают косвенное влияние водохранилища. Подтопление прилегающих к водохранилищу земель происходит из-за повышения уровня грунтовых вод в береговой зоне водохранилища под влиянием подпора. Вследствие этого изменяется характер водообмена зоны аэрации с зоной грунтовых вод, а также режим испарения с подтопленной зоны. В третьей зоне изменение водообмена при создании водохранилища связано с режимом регулирования стока. В связи с тем, что водохранилища «срезают» пики половодий и паводков и выравнивают ход стока внутри года, площади затопления в прирусловой области реки ниже створа плотины и в дельте сокращаются, что приводит в основном к изменению режима испарения с тех участков суши, которые до создания водохранилища подвергались интенсивному затоплению.

2.4. Уравнения взаимосвязи элементов водообмена в системе водохранилище — речной бассейн

Приведенные в предыдущих пунктах общие структуры уравнений водного баланса речного бассейна и водохранилища позволяют получить выражения, характеризующие взаимосвязи между элементами водообмена указанных водных объектов для трех характерных зон речного бассейна.

Для зоны затопления речного бассейна уравнение водного баланса для естественных условий с учетом выражения (2.1) будет

иметь следующий вид:

$$P + I_{\text{п}} - E - Q + \Delta W_{\text{п. з}} + \Delta W_{\text{з. а}} + \Delta W_{\text{г. в}} + s = 0, \qquad (2.6)$$

где $I_{\text{п}}$ — поверхностный приток к зоне, Q — сток за пределы зоны.

Решив совместно уравнения (2.5) и (2.6) без учета невязок, исключив одинаковые составляющие (P, $I_{\text{п}}$) и произведя некоторые преобразования, можно получить следующее выражение:

$$(Q_{\text{п}} - Q) = (E - E_{\text{в}}) + (\Delta W_{\text{п}} - \Delta W_{\text{п. з}} - \Delta W_{\text{з. а}}) + (\Delta W_{\text{г}} - \Delta W_{\text{г. в}}), \qquad (2.7)$$

Данная зависимость наиболее наглядно отражает взаимосвязи между отдельными элементами влагообмена в рассматриваемой зоне до и после ее затопления. Действительно, все изменения в системе влагооборота в связи с созданием водохранилища проявятся в изменении стока с территории: $\Delta Q = (Q_{\text{п}} - Q)$. Масштабы этого изменения будут зависеть от того, насколько изменятся объемы испарившейся влаги с территории и запасы воды в пределах контура, ограниченного с поверхности урезом водохранилища, а снизу водоупором.

При выводе уравнения взаимосвязи для зоны подтопления совместно решены уравнения водного баланса вида (2.6) для естественных условий и стадии подтопления. После ряда преобразований получено следующее выражение:

$$(Q^* - Q) = (E^* - E) + (\Delta W_{\text{г. в}} - \Delta W^*_{\text{г. в}}) + (\Delta W_{\text{з. а}} - \Delta W^*_{\text{з. а}}), \qquad (2.8)$$

где Q^* и E^* — сток и испарение с подтопленной территории соответственно, где $\Delta W^*_{\text{з. а}}$ и $\Delta W^*_{\text{г. в}}$ — изменения запасов воды в зонах аэрации и грунтовых вод после подтопления соответственно.

Таким образом, в рассматриваемой зоне при подтоплении изменяется испарение и влагообмен в зонах аэрации и грунтовых вод, что приводит к потерям речного стока.

Для третьей зоны, охватывающей прирусловую часть поймы реки ниже подпорного сооружения и дельтовую область, при выводе уравнения взаимосвязи в качестве исходного использовано уравнение (2.6), в результате решения которого для естественных условий и для периода после создания водохранилища было получено следующее уравнение взаимосвязи:

$$(Q' - Q) = (I_{\text{п}} - I'_{\text{п}}) + (E - E'), \qquad (2.9)$$

где Q', $I'_{\text{п}}$ и E' — соответственно сток с зоны, приток в зону и испарение с ее поверхности для периода после создания водохранилища.

Следовательно, в третьей зоне за счет регулирования стока изменятся приток в зону и испарение, что повлияет на сток в замыкающем створе реки.

На рис. 2.1 показаны основные составляющие водного баланса речного бассейна и водохранилища, обозначения которых даны в формулах (2.1)—(2.6). Эти уравнения взаимосвязи использованы при выводе расчетных формул для оценки влияния водохранилищ на речной сток (см. гл. 8).

Характер влагообмена в природно-техногенной системе речной бассейн—водохранилище определяет основные воднобалансовые соотношения искусственного водоема и условия формирования его водных ресурсов (см. п. 2.1). Эти вопросы детально изложены в последующих главах.

ЧАСТЬ II. ВОДНЫЙ БАЛАНС КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ СССР

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ВОДОХРАНИЛИЩ

Здесь рассмотрены методы расчета основных элементов водного баланса, входящих в уравнение (2.5), за исключением поверхностного стока из водохранилища ($Q_п$). Как известно, сток из крупных водохранилищ измеряют на ГЭС по градуировочным характеристикам турбин, водосливов и других гидротехнических сооружений. Погрешности измерения стока на ГЭС составляют ± 5 %, что вполне удовлетворяет существующую практику воднобалансовых расчетов. Вопросы усовершенствования методов учета стока на ГЭС выходят за рамки данного исследования и в настоящей работе не рассмотрены.

В системе Госкомгидромета СССР с начала 60-х годов составляют оперативные (по истечении декады и месяца) и режимные (по истечении года) водные балансы многих крупных озер и водохранилищ СССР. Выбор указанных достаточно продолжительных расчетных интервалов связан, в первую очередь, с крайне низкой плотностью гидрологической сети на водоемах СССР, вследствие чего невозможно осуществлять с необходимой точностью массовые воднобалансовые расчеты за более короткие интервалы времени. Именно поэтому и в настоящей работе основное внимание уделено методическим и практическим аспектам воднобалансовых исследований применительно к месячному и годовому периодам.

3.1. Поверхностный приток

Поверхностный приток является главным элементов приходной части водного баланса. Он формируется водами постоянных и временных водотоков, а также за счет склонового стока с прибрежных межбассейновых территорий. Выполненный анализ имеющихся немногочисленных данных об объеме склонового стока показал, что определяющая роль в формировании поверхностного притока принадлежит постоянно действующим водотокам, сток которых составляет не менее 95 % суммарного притока к водохранилищам. Даже при расчетах месячного баланса за периоды весеннего половодья или дождевых паводков, когда на поверхность водосбора поступают большие объемы воды, нет необходимости определять склоновый сток, так как его вклад в общий объем притока обычно составляет 1—3 %.

Как известно, поверхностный приток к водохранилищам, созданным в руслах рек, принято подразделять на основной и

Таблица 3.1

Доля бокового притока к крупным водохранилищам и их каскадам

Водохранилище	Площадь		Приток	
	всего бассейна	частного водосбора	общий	боковой
Волжско-Камский каскад				
Иваньковское	40,7	8,0/20	8,8	1,4/16
Угличское	59,4	18,8/31	12,4	3,6/29
Шекснинское	17,8	11,7/65	4,5	3,4/76
Рыбинское	143,2	66,0/46	32,5	15,6/48
Горьковское	220,6	77,4/35	50,8	18,3/36
Чебоксарское	594,4	373,8/63	109,5	58,7/54
Камское	166,1	68,0/41	52,0	17,6/34
Воткинское	180,0	13,9/8	54,5	2,9/5
Нижнекамское	364,4	184,4/51	90,5	35,6/39
Камский каскад	364,4	266,3/73	90,5	56,1/62
Куйбышевское	1187,3	228,5/19	239,1	39,1/16
Саратовское	1265,5	78,2/6	244,0	5,6/2
Волгоградское	1332,4	66,9/5	246,7	3,1/1
Волжско-Камский каскад	1332,4	1195,6/90	246,7	204,8/83
Енисейский каскад				
Саяно-Шушенское	182,0	67,0/37	47,6	15,3/32
Красноярское	287,0	105,0/37	90,2	42,6/47
Ангарский каскад				
Иркутское (с оз. Байкал)	541,8	541,8/100	62,4	62,4/100
Братское	699,3	157,5/23	94,2	32,8/35
Усть-Илимское	746,4	47,1/6	100,7	6,8/7
Нарынский каскад				
Токтогульское	50,4	15,8/31	11,5	3,5/30
Учкурганское	56,8	6,4/11	13,8	2,6/19
Одиночные водохранилища				
Зейское	82,4	52,1/63	23,3	8,0/34
Ириклинское	36,6	3,8/10	1,5	0,5/33
Краснооскольское	14,6	1,9/13	1,2	0,1/8
Новосибирское	230,9	13,5/6	56,1	1,9/3
Ортотокойское	6,0	0,6/10	0,3	0,02/7
Печенежское	3,4	2,7/79	0,6	0,2/3 3
Цимлянское	222,0	41,6/2	20,5	1,1/5

Примечания: 1. В знаменателе — проценты общей площади бассейна и общего притока соответственно; в числителе — площадь частного водосбора (тыс км^2) и боковой приток (км^3/год) соответственно. 2. Данные о площадях и объеме притока к водохранилищам приведены по справочнику [117]. 3. Площади бассейнов до створов ГЭС не включают в себя площадей вышележащих водохранилищ.

боковой. Основной приток формируется за счет стока одной главной реки, на которой создано водохранилище, или нескольких основных рек, впадающих в него. Боковой приток формируется за счет стока малых и средних рек, впадающих по периферии водохранилища. Анализ имеющихся данных о соотношениях между основным и боковым притоками к крупным водохранилищам СССР позволил установить, что доля бокового притока в суммарном поступлении воды с бассейна колеблется в широких пределах, 1—50 % и более (табл. 3.1).

При каскадном расположении водохранилищ под боковым притоком к расположенному ниже по течению водохранилищу каскада понимают суммарный объем притока, формирующегося с частной площади бассейна, ограниченной створом плотины расположенного выше по течению водохранилища. Выполненное обобщение данных о доле бокового притока к каждому из водохранилищ Волжско-Камского, Ангаро-Енисейского и Нарынского каскадов подтвердило выводы о характере соотношений между основным и боковым притоками, полученные ранее для одиночных водохранилищ.

В связи с тем, что гидрометрическими измерениями наиболее полно охвачены крупные реки, а на средних и тем более малых реках число гидрометрических створов существенно меньше, наиболее надежно учитывают поверхностный приток к водохранилищам, созданным в руслах крупных рек СССР. Для озерных водохранилищ задача надежной оценки поверхностного притока намного сложней, так как наблюдениями за стоком во многих случаях охвачено только 60—70 % их площади водосборов.

При расчетах водного баланса водохранилищ за месяц и год наибольшее распространение получил метод подсчета поверхностного притока по сумме расходов воды впадающих рек с подбором для неизученной территории рек-аналогов. Кроме того, в последние годы для этой цели используют ряд методов, основанных на применении аппарата математической статистики, которые легко реализуют на ЭВМ.

3.1.1. Подсчет притока по сумме расходов воды впадающих рек

Этот прием заключается в суммировании расходов воды, полученных по данным измерений на притоках, с рассчитанными для неизученной территории водосбора. Суммарный приток к водохранилищу по данным измерений ($y_п$) определяют, используя линейные уравнения стока типа

$$y_п = k_1 y_1 + k_2 y_2 + \ldots + k_n y_n, \qquad (3.1)$$

где y_1, y_2, ..., y_n — сток отдельных рек, определенный по ближайшему к водохранилищу гидрометрическому створу; k_1, k_2, ..., k_n — коэффициенты приведения значений стока к урезу водохранилища.

Необходимость определения этих коэффициентов может возникнуть тогда, когда сток измеряют на значительном расстоянии от уреза водохранилища. Коэффициенты определяют, как правило, по соотношению между площадями водосбора, отнесенными к урезу водохранилища и гидрометрическому створу. Значения их в большинстве случаев принимают постоянными для каждого расчетного гидрометрического створа. Этот прием требует тщательного обоснования при определении коэффициента k для полизональных рек с разными условиями формирования стока в разных частях бассейна.

Следует отметить, что в практике составления Госкомгидрометом СССР оперативных и многолетних водных балансов водохранилищ, коэффициенты k, как правило, не рассчитывают, так как считают, что их использование не приводит к сколько-нибудь ощутимым изменениям суммарного значения бокового притока с изученной территории. Не делают этого и авторы комплексных водобалансовых исследований водохранилищ, в частности Р. И. Гета (Братское водохранилище), В. Г. Булат (Каховское водохранилище), Е. Ф. Семенов (Цимлянское водохранилище), А. И. Кабранова (Выгозерско-Ондское водохранилище) и другие [41, 66, 88, 129, 136]. В то же время в случае значительного удаления расчетного створа от уреза водохранилища при оценке притока по основной реке корректировка измеренных значений стока с использованием коэффициентов k необходима.

Весьма ответственной частью расчетов является определение притока с неизученной в гидрометрическом отношении территории водосбора водохранилища. Для этого используют удельные значения стока, получаемые по рекам-аналогам, расположенным в районе водохранилища. Различные способы определения притока с неизученной территории по методу рек-аналогов систематизированы Р. А. Нежиховским [119].

Тем не менее, выбор надежных аналогов представляет собой достаточно сложную задачу, так как каждый отдельный водоток характеризуется определенной совокупностью только ему присущих природных особенностей и условий формировния стока.

В целях более надежной оценки притока в водохранилище с неизученной в гидрометрическом отношении площади его бассейна рекомендуется районировать территорию по условиям формирования стока.

Так, например, при оценке притока с неизученной территории водосбора Братского водохранилища Р. И. Гета использовал зависимости стока от средней высоты водосбора, полученные для четырех отдельно выделенных районов [66].

В связи с тем, что водохранилища весьма сильно различаются как по степени гидрометрической изученности их бассейнов, так и по расположению гидрометрических створов на впадающих в них водотоках, оценка суммарного притока воды к конкретному водохранилищу является по существу самостоятельной научной задачей. Для многих крупных водохранилищ СССР расчеты при-

тока за год и месяц с использованием указанного уравнения успешно выполняют сетевые подразделения Госкомгидромета СССР (ГМО, озерные станции), а данные о притоке регулярно публикуют в материалах Государственного водного кадастра.

Несмотря на широкое использование при оценке притока воды к водохранилищам метода линейных уравнений стока он имеет существенные недостатки, связанные со сложностью подбора аналогов. Кроме того, по мере накопления и расширения информации о стоке впадающих в водохранилище рек структура правой части уравнения может меняться за счет включения дополнительных аргументов, что нарушает однородность рядов притока. Поэтому в последние годы наряду с использованием указанного уравнения для оценки притока воды к водохранилищам стали применять современные статистические методы, реализация которых связана с использованием ЭВМ.

3.1.2. Метод последовательной комплексной регрессии

В 1981 г. В. Ф. Крюков [100, 101] для оценки притока воды к озерам и водохранилищам предложил метод последовательной комплексной регрессии (ПКР), основанный на последовательном решении уравнений множественной линейной регрессии или их логарифмических вариантов. Такие уравнения решают сначала для отдельных первичных комплексов аргументов x_1, x_2, x_3, ..., x_n. В состав каждого первичного комплекса входят функция (в данном случае сток) и три-четыре первичных аргумента, представляющих собой логически связанные факторы, определяющие условия формирования стока. При расчетах по полной схеме в качестве исходных В. Ф. Крюков рекомендовал использовать 17 аргументов, приведенных в табл. 3.2, а по сокращенной схеме — 5 из них (x_1, x_2, x_3, x_{16}, x_{17}). В обеих схемах все аргументы, кроме последнего, являются обязательными, а последний аргумент — залесенность рассматривают в качестве произвольного. Его можно опустить или заменить другими (например, значениями озерности или заболоченности). Для каждого из пяти комплексов, указанных в табл. 3.2, составляют пять уравнений регрессии:

для первого комплекса

$$\log M = \log \tilde{M}_1 = A_1 \log x_1 + A_2 \log x_2 + A_3 \log x_3 + A_4, \quad (3.2)$$

для второго комплекса

$$\log M = \log \tilde{M}_2 = A_5 \log x_4 + A_6 \log x_5 + A_7 \log x_6 + A_8 \quad (3.3)$$

и т. д. В уравнениях (3.2) и (3.3) A_1, A_2, ..., A_n — коэффициенты и свободные члены уравнений регрессии. Подставив в эти уравнения значения аргументов x_1, x_2, ..., x_{15}, находят пять комплексных аргументов $\log \tilde{M}_i$. На втором этапе расчетов решают уравнение

Таблица 3.2

Система исходных аргументов и первичные комплексы (по В. Ф. Крюкову)

Аргумент	Номер первичного комплекса
Водосбор	
1. Абсцисса центра тяжести 2. Ордината центра тяжести 3. Средняя высота	1
Исток реки	
4. Абсцисса 5. Ордината 6. Высота	2
Гидрометрический створ	
7. Абсцисса 8. Ордината 9. Высота	3
Исток первого крупного притока реки	
10. Абсцисса 11. Ордината 12. Высота	4
Исток второго крупного притока реки	
13. Абсцисса 14. Ордината 15. Высота	5
16. Площадь водосбора реки	—
17. Залесенность бассейна реки	—

Примечание. За начало координатных осей принимают условную точку на карте, расположенную слева и внизу от водосбора озера (чтобы снимаемые значения обеих координат были положительные).

регрессии в зависимости от комплексных аргументов:

$$\log M = \log M_{бл} = B_1 \log \tilde{M}_1 + B_2 \log \tilde{M}_2 + \\ + B_3 \log \tilde{M}_3 + B_4 \log \tilde{M}_4 + B_5 \log \tilde{M}_5 + B_6, \qquad (3.4)$$

где $M_{бл}$ — так называемый блочный комплексный аргумент.

На третьем этапе расчетов решают уравнение регрессии относительно блочного аргумента и аргументов x_{16} и x_{17}, не вошедших в комплексы:

$$\log M = C_1 \log \tilde{M}_{бл} + C_2 \log x_{16} + C_3 \log x_{17} + C_4, \qquad (3.5)$$

где M — модуль стока.

Подставляя значения аргументов гидрометрически неизученной реки в соответствующие уравнения регрессии, находят значе-

ния $\log M_i$, а затем по формуле (3.5) — расчетные значения стока. Суммарный приток к водохранилищу рассчитывают по сумме притока изученных и неизученных рек. Расчеты по изложенной методике (с использованием всех 17 аргументов) выполнены В. Ф. Крюковым совместно с Т. Э. Литовой на примере Красноярского, Саяно-Шушенского и Верхневолжских водохранилищ применительно к суткам, декаде, месяцу, кварталу и году, Точность вычисления отдельных значений притока оказалась достаточно высокой (сводные коэффициенты корреляции больше 0,8), что позволило указанным авторам сделать вывод о перспективности использования данного метода для расчетов притока воды в водохранилища. Выполненные Крюковым расчеты с использованием только пяти аргументов не оказались обнадеживающими. Полученные данные были отнесены им к разряду ориентировочных.

В целях проверки метода ПКР автор совместно с Н. М. Тиморшиным повторил расчеты притока к Красноярскому и Саяно-Шушенскому водохранилищам. При независимом определении 17 исходных аргументов результаты расчетов практически совпали. Однако определение 15 первичных аргументов по крупномасштабным картам для 62 изученных и более 40 неизученных водосборов оказалось делом далеко не таким легким, как считал В. Ф. Крюков. Было установлено, что данная процедура отличается большой трудоемкостью. Также была предпринята попытка расчета среднемесячного притока воды в водохранилища Ангарского каскада с использованием только пяти аргументов, предложенных Крюковым (x_1, x_2, x_3, x_{16}, x_{17}). Результаты расчетов оказались неудовлетворительными — значения сводных коэффициентов корреляции для отдельных месяцев не превышали 0,5—0,6. При этом наиболее низкие значения коэффициентов корреляции приходились на зимние месяцы. Последнее обстоятельство свидетельствовало о том, что ни один из использованных аргументов не характеризует условия формирования стока в зимние месяцы, когда реки в основном имеют подземное питание. Поэтому в расчетную схему был введен дополнительный, шестой, аргумент, характеризующий особенности формирования подземного стока в конкретном году, — коэффициент $\alpha = M_{\text{мин}80\,\%}/M_0$, где $M_{\text{мин}80\,\%}$ — минимальный 30-суточный модуль стока 80 %-ной обеспеченности, M_0 — среднегодовой модуль стока. Включение этого аргумента в расчетную схему существенно улучшило результаты расчетов.

Сводные коэффициенты корреляции, полученные при определении месячных значений суммарного притока в оз. Байкал за период 1957—1979 гг., в большинстве случаев оказались выше 0,9, а при определении притока в Братское и Усть-Илимское водохранилища Ангарского каскада за период 1957—1979 гг. в большинстве случаев превышали 0,85. Только для двух зимних месяцев (февраль и март) отдельных лет (1957, 1971, 1972 и 1979) их значения для водохранилищ Ангарского каскада оказались близкими к 0,5. Выполненные вариантные расчеты с использованием шести

и семи аргументов, взятых в различных сочетаниях из числа 17 аргументов, предложенных Крюковым, не дали обнадеживающих результатов.

Таким образом, при выполнении расчетов с ограниченным числом аргументов важно, чтобы они характеризовали все фазы водного режима реки. Полученные положительные результаты при включении в качестве шестого аргумента коэффициента α свидетельствуют о правомерности применения метода ПКР с ограниченным составом аргументов.

В ГГИ Н. М. Тиморшин разработал программу расчета на ЭВМ ЕС-1045 притока воды в водохранилища, реализующую метод ПКР. Она позволяет использовать до 25 аргументов и до 300 расчетных створов. В необходимых случаях восстанавливаются пропуски в наблюдениях. На печать выдаются как суммарные значения притока воды в водохранилище, так и данные отдельно для изученной и неизученной в гидрометрическом отношении территории.

3.1.3. Метод разложения полей на естественные ортогональные составляющие

Новый подход к решению задачи расчета притока воды к крупным водоемам СССР связан с применением метода разложения полей на естественные ортогональные составляющие (ЕОС). Этот метод достаточно широко распространен в метеорологии [16, 111]. Первая попытка его использования для оценки притока воды в Горьковское водохранилище принадлежит И. Ф. Карасеву [90]. Основой разложения исходного поля на ЕОС является ковариационная или корреляционная матрица. После разложения поля, заданного исходной матрицей, каждый ее элемент представляют в виде суммы произведений функции X_{kj} на коэффициент A_{ki}:

$$\tilde{q}_{ij} = \sum_{n}^{l} A_{ki} X_{kj}, \tag{3.6}$$

где $l = n$ — число слагаемых (членов разложения).

Разложение поля на ЕОС позволяет выявить различие вкладов отдельных составляющих в изменчивость изучаемых характеристик — от первых компонентов $A_{1i}X_{1j}$, соответствующих наибольшему вкладу, до всех последующих, вплоть до $l = n$ в убывающем порядке. Практически для адекватного представления поля элемента достаточно использовать первые три-четыре члена.

Для оценки притока воды в водохранилище сначала на основании данных о стоке изученных рек поле стока разлагают на ЕОС до первых трех компонентов. Затем анализируют полученные первые три вектора в целях установления их связей с ландшафтно-гидрографическими характеристиками бассейна. После установления таких связей определяют сток неизученных в гидро-

метрическом отношении водотоков с использованием расчетной формулы

$$Q_{ij} = (1 + \tilde{q}_{ij})\,\overline{Q}_j = \left(1 + \sum_{n=1}^{l} A_{ki}X_{kj}\right)\overline{Q}_j. \qquad (3.7)$$

Значения $A_{ki}X_{kj}$ устанавливают на основании полученных ранее связей с ландшафтно-гидрографическими характеристиками бассейнов. Данная методика применена Карасевым для расчета годовых объемов притока воды в Горьковское водохранилище с использованием двух вариантов совокупностей: полной (20 постов за период 1970—1981 гг.) и сокращенной (10 постов за период 1976—1981 гг.). Расчеты выполнены по стандартной программе на ЭВМ ЕС-1022. Первый член разложения $A_{1i}X_{1j}$ оказался непосредственно связанным с динамикой поверхностного питания рек талыми водами, второй — с долей грунтового питания в общем объеме речного стока. Третий вектор оказался достаточно тесно связан со средним уклоном водосбора. Построены графики связи для всех трех векторов, и с их использованием определен поверхностный приток с неизученной части бассейна по формуле (3.7). Результаты выполненных расчетов удовлетворительные.

Т. Э. Литова под руководством автора применила метод разложения полей на ЕОС для оценки притока с неизученной части бассейна оз. Байкал. Использованы данные о расходах воды в 23 гидрометрических створах на реках, впадающих в озеро, за средний по водности период 1960—1979 гг.

После разложения поля стока на ЕОС оказалось возможным интерпретировать первые три вектора как факторы увлажненности территории и установить их зависимости от средней высоты водосборов. Кроме того, для второго и третьего векторов установлены связи со средневзвешенным уклоном рек, что свидетельствует о том, что эти векторы характеризуют влияние геологической структуры водосборов на речной сток. Интерпретировать характер хода четвертого вектора не удалось. Результаты выполненных расчетов притока в оз. Байкал по методу ЕОС за характерные по водности годы с использованием установленных зависимостей практически совпадают с соответствующими значениями притока, вычисленными с применением традиционного метода гидрологической аналогии (табл. 3.3).

В целях проверки устойчивости решений в зависимости от длины используемых выборок выполнены дополнительные расчеты за период повышенной водности (1960—1969 гг.) и маловодный период (1970—1979 гг.). При этом установлено, что коэффициенты уравнений регрессии устойчивы, т. е. не изменяются в зависимости от длины используемых выборок.

Таким образом, первый весьма ограниченный опыт использования метода разложения поля стока на ЕОС для оценки притока воды к Горьковскому водохранилищу и в оз. Байкал дал обнадеживающие результаты. Необходимо дальнейшее развитие

Таблица 3.3

Сравнительные результаты расчетов притока воды с неизученной площади бассейна оз. Байкал методами гидрологической аналогии (числитель) и ЕОС (знаменатель)

Месяц	Приток воды, м³/с		
	Многоводный 1962 г.	Средний по водности 1963 г.	Маловодный 1979 г.
Январь	130/120	85,8/125	114/115
Февраль	116/110	74,4/112	71,9/106
Март	112/106	78,4/109	73,9/107
Апрель	166/238	112/159	96,9/145
Май	690/563	504/566	720/782
Июнь	1320/1249	988/1150	1124/1074
Июль	1175/1130	828/804	340/361
Август	507/566	448/477	340/341
Сентябрь	405/386	537/545	341/304
Октябрь	209/294	306/328	304/232
Ноябрь	135/151	189/212	193/136
Декабрь	127/152	138/346	117/131

исследований в рассматриваемой области в целях более надежной интерпретации первых членов разложения, установления наиболее оптимальных расчетных периодов и т. д.

3.1.4. Метод интегрального осреднения функции, описывающей „поверхность" стока

В числе методических приемов, применение которых может существенно сократить трудоемкость расчетов притока воды к водохранилищам без снижения их точности, необходимо упомянуть метод интегрального осреднения функции, описывающей «поверхность» стока. Этот метод применительно к гидрологическим расчетам был опубликован в работе В. И. Бабкина, О. А. Гусева и В. А. Новиковой в 1974 г. [14]. Сущность его заключается в построении уравнения «поверхности» стока в бассейне водохранилища с последующим его интегрированием с учетом контуров водосбора. Уравнение поверхности стока имеет вид

$$y = a_0 + a_1\varphi + a_2\lambda + a_3h + a_4\varphi\lambda + a_5\varphi h + \\ + a_6\lambda h + a_7\varphi^2 + a_8\lambda^2 + a_9h^2, \qquad (3.8)$$

где $a_1, a_2, \ldots, a_n$ — коэффициенты; φ и λ — условные прямоугольные координаты центров тяжести речных бассейнов; h — средняя высота водосбора.

Весь бассейн схематизируют и разбивают на геометрические фигуры (прямоугольники, треугольники, трапеции), и уравнение «поверхности» интегрируют по площадям этих фигур с последующим суммированием полученных результатов для всего бассейна.

Метод интегрального осреднения функции и упоминавшийся метод ПКР успешно применены при подготовке по заданию Гос-

комгидромета СССР справочного пособия «Многолетние характеристики притока воды к водохранилищам крупных ГЭС СССР» [117]. В ходе этой работы, выполнявшейся под научным руководством автора, рассчитаны значения месячного и годового притока воды в Иваньковское и Братское водохранилища. Результаты выполненных расчетов (табл. 3.4) свидетельствуют о достаточной

Таблица 3.4

Оценка различными методами притока воды по месяцам и за год в Братское и Иваньковское водохранилища, км³

Водохранилище, год исследования	Метод оценки	I	II	III	IV	V	VI
Иваньковское:							
1970	1	0,31	0,25	0,26	21,1	1,33	0,61
	2	0,37	0,33	0,38	19,9	1,82	0,58
1980	1	0,26	0,31	0,33	1,53	1,37	0,59
	3	0,25	0,24	0,28	1,63	1,40	0,57
Братское, 1979	1	0,39	0,29	0,37	0,69	5,04	3,81
	3	0,42	0,36	0,43	0,81	3,65	3,70

Водохранилище, год исследования	Метод оценки	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Иваньковское:								
1970	1	0,25	0,21	0,20	0,29	0,92	0,53	26,2
	2	0,27	0,17	0,19	0,44	0,86	0,48	26,8
1980	1	1,77	2,28	1,54	0,92	0,91	0,55	12,4
	3	2,00	2,31	1,43	0,87	0,99	0,57	12,5
Братское, 1979	1	3,73	4,33	3,03	1,93	0,71	0,63	25,0
	3	3,64	4,25	2,89	1,80	0,88	0,67	23,5

Примечание. 1 — метод линейных уравнений, 2 — метод ПКР, 3 — метод интегрального осреднения.

надежности рассматриваемых методических приемов. Их можно использовать для определения притока воды в крупные водохранилища, на притоках которых имеется не менее 10 гидрометрических створов, а также для нескольких расположенных рядом водохранилищ с однородными условиями формирования стока.

3.2. Атмосферные осадки

Для определения среднего слоя осадков, выпадающих на поверхность водоема, применяют в основном три метода: метод среднего арифметического (при равномерном расположении пунктов наблюдений), метод средневзвешенного (с учетом площадей частей водоема, тяготеющих к отдельным метеостанциям) и метод изогиет (построение карты осадков и ее планиметрирование).

При неравномерном размещении пунктов наблюдений за осадками применение двух последних методов не исключает некоторой субъективности. В целях усовершенствования методики оценки среднего слоя атмосферных осадков для водоема А. П. Браславский предложил метод универсальной интерполяции полей атмосферных осадков, представляющий собой разновидность метода средневзвешенного [31]. Формула универсальной интерполяции атмосферных осадков имеет вид

$$x = (x_1 x_0/x_{0_1}) P_1 + (x_2 x_0/x_{0_2}) P_2 + \ldots + (x_n x_0/x_{0_n}) P_n, \qquad (3.9)$$

где x — средний слой осадков для водоема; x_0 — средний слой осадков для пункта; $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — наблюденные значения осадков в пунктах 1, 2 ... n; $x_{0_1}, x_{0_2}, \ldots, x_{0_n}$ — нормы осадков в этих пунктах; $P_1, P_2, \ldots, P_n$ — весовые коэффициенты, которые вычисляют по формуле

$$P_i = \mu_i \Big/ \sum_1^n \mu, \qquad (3.10)$$

где n — число метеостанций, участвующих в вычислении слоя осадков, а параметр μ представляет собой функцию влияния:

$$\mu = 1/(1 + al^{\alpha}), \qquad (3.11)$$

где l — расстояние между станциями; a и α — коэффициенты, определяемые методом подбора.

К сожалению, А. П. Браславский не показал на конкретных примерах, какие результаты дает предложенная им формула. Она, безусловно, требует тщательной проверки, в том числе и в отношении устойчивости параметров, полученных методом подбора.

3.2.1. Определение степени соответствия средних значений осадков, полученных по береговым и островным метеостанциям

Как известно, основным источником информации об осадках, выпадающих на поверхность водоема, являются данные прибрежных метеостанций. Островных станций даже на крупнейших водоемах СССР чрезвычайно мало. Поэтому достаточно долго обсуждают вопрос о возможности непосредственного перенесения данных, полученных по береговым метеостанциям, на водоем. Данный вопрос напрямую связан и с вопросом о введении поправок в измеренные суммы осадков, используемые в дальнейшем для воднобалансовых расчетов. Основным источником информации об атмосферных осадках в настоящее время служат данные наблюдений за осадками по осадкомеру Третьякова, имеющему площадь приемной поверхности 200 см^2 и лепестковую защиту. Как известно, этим прибором измеряют осадки с систематической погрешностью, связанной с потерями на испарение из осадкомер-

ного сосуда и смачивание его стенок и дна, а также с ветровым недоучетом осадков.

Вместе с тем, в данные наблюдений за осадками в настоящее время вводят только поправку на смачивание по методике ГГО [149]. Следует отметить, что в 60—70-х годах разработаны методические приемы корректировки измеренных осадков с учетом всех отмеченных погрешностей измерений. Однако до настоящего времени отсутствует единая методика исправления измеренных сумм осадков всеми видами поправок. Для этой цели рекомендованы методика ГГО [149], методики ГГИ 1967 [56] и 1964 гг. [110] и метод, предложенный совместно ГГО и КазНИГМИ [36].

Можно согласиться с мнением А. П. Браславского и С. П. Чистяевой о том, что в области публикации данных об атмосферных осадках существует ненормальное положение [37]. Объективности ради надо подчеркнуть, что применительно к оценке осадков при воднобалансовых исследованиях большинство ученых указывают на необходимость корректировки измеренных сумм осадков с учетом всех трех видов поправок. При составлении текущих водных балансов озер и водохранилищ начиная с 1961 г. в суммы осадков вводят все указанные виды поправок.

Существенное отличие исправленных сумм осадков от измеренных заставило пересмотреть некоторые представления как об их роли в водном балансе водохранилищ, так и о закономерностях формирования осадков на акватории и в прибрежной зоне водоемов. Воднобалансовые расчеты, выполненные с использованием исправленных сумм осадков, указали на более существенную роль осадков, как приходного компонента баланса. Так, например, в уточненном водном балансе оз. Байкал, рассчитанном в ГГИ с учетом исправленных сумм осадков, последние составили 17,6 % в общем приходе воды против 13 % в прежних расчетах, выполненных различными авторами без корректировки осадков [116].

Исследования, выполненные на Рыбинском водохранилище, показали, что осадкомер, установленный на берегу (станция Рожновский Мыс) при сильном ветре (более 7 м/с), недоучитывал 30—50 % твердых и 10—20 % жидких осадков [17].

Как известно, долгое время существовало представление о том, что над акваторией крупных водоемов осадков выпадает на 8—10 % меньше, чем над окружающей водоем сушей. Ц. А. Швер указывает, что над водоемами площадью более 5000 км^2 уменьшение осадков составляет около 15—25 %, а над водоемами меньшей площади — 5—10 % годовой суммы осадков на суше [155].

Эти выводы были получены на основании сопоставления измеренных сумм осадков по береговым и островным осадкомерным приборам без введения в них всех видов поправок. Так, А. А. Натрус в 1964 г. определила [115], что осадкомеры, установленные на островах Верхне — Свирского водохранилища, фиксируют меньшие на 30—40 % суммы осадков по сравнению с береговыми

приборами. Коллектив исследователей, изучавших метеорологический режим Куйбышевского водохранилища, установил в 1963 г., что акватория водохранилища в теплый период года получает меньшие суммы осадков, чем прилегающая суша. Разница в среднемесячных значениях достигала 20 мм [24].

Полученные в последнее время с учетом введения всех видов поправок данные выявили значительно меньшую разницу в показаниях островных и береговых станций на ряде крупных водоемов СССР. Эта разница не превышала 5—6 %, что находится в пределах точности измерения осадков. Данный факт объясняют тем, что ранее до введения поправок не учитывали эффект большего выдувания осадков из приборов, установленных на островах по сравнению с береговыми установками за счет более высокой скорости ветра на островных станциях. Учесть это обстоятельство пыталась А. А. Натрус, которая в показания островных станций, расположенных на Рыбинском водохранилище, вводила поправку на выдувание осадков с использованием эмпирической зависимости В. С. Голубева [68]. Согласно ее исследованиям, после введения поправки показания островных и береговых станций различались для месячных интервалов времени теплого периода года в основном на 10—15 %, в отдельных случаях — на 30 %.

На примере шести станций, расположенных на островах оз. Байкал (Иркутское водохранилище) и в его береговой зоне, автор рассмотрел вопрос о том, насколько суммы осадков, полученные по островным станциям, отличаются от данных береговых пунктов наблюдений. Названия станций и их местоположение указаны на рис. 3.1. Три станции — Хужир, Узур и Большой Ушканий остров — расположены на островах, станция Нижнее Изголовье — на глубоко вдающемся в озеро мысе и две станции — Сарма и Давша — расположены в береговой зоне. Был выполнен анализ месячных сумм осадков за период 1967—1976 гг. В качестве исходных были приняты значения осадков, исправленные поправкой на смачивание. Кроме того, были рассчитаны месячные суммы осадков, исправленные всеми тремя видами поправок — на смачивание, испарение и ветровой недоучет в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [110]. Были также подсчитаны годовые суммы осадков по всем станциям за указанный период исходя из месячных сумм, откорректированных двумя указанными способами (табл. 3.5). К сожалению, в этой таблице есть пропуски, так как из-за пропусков в наблюдениях не во всех случаях получены годовые суммы осадков.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

1. Отсутствует какая-либо однонаправленная тенденция уменьшения или увеличения годовых сумм осадков на островных станциях по сравнению с береговыми, независимо от того, введена только поправка на смачивание или все три вида поправок. Для района расположения станций характерно увеличение осадков с запада на восток. У более возвышенного восточного берега

Байкала выпадает большее количество осадков, о чем свидетельствуют данные станций Давша и Нижнее Изголовье.

2. Месячные суммы жидких осадков, исправленные тремя видами поправок, для всех рассмотренных станций в большинстве

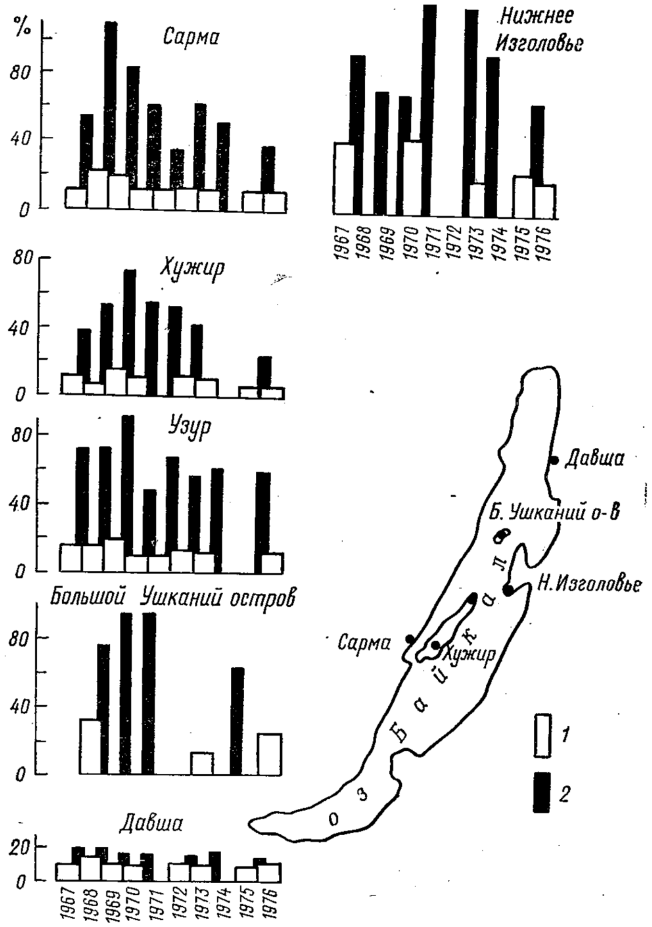


Рис. 3.1. Превышение исправленных всеми видами поправок годовых (*1*) и зимних (*2*) сумм осадков над измеренными по станциям, расположенным на оз. Байкал.

Станция Узур находится на севере о. Ольхон.

случаев на 8—10 % превышают значения осадков, исправленных только поправкой на смачивание. В отдельных случаях эта разница может достигать 15 %.

3. Месячные суммы твердых осадков, исправленные всеми видами поправок, для станции Сарма, расположенной на западном берегу озера, а также для островных станций и станции Нижнее Изголовье превышают суммы осадков, исправленные только

Таблица 3.5

Суммы осадков, исправленных всеми видами поправок (x'), и только поправкой на смачивание (x) для ряда станций на оз. Байкал

Год	Сарма			Хужир			Узур			Большой Ушканий остров			Давша			Нижнее Изголовье		
	x	x'	$\frac{x'}{x}$ 100 %	x	x'	$\frac{x'}{x}$ 100 %	x	x'	$\frac{x'}{x}$ 100 %	x	x'	$\frac{x'}{x}$ 100 %	x	x'	$\frac{x'}{x}$ 100 %	x	x'	$\frac{x'}{x}$ 100 %
1967	306	336	110	232	255	110	296	340	115				391	431	110	467	658	141
1968	201	254	126	204	217	106	197	129	116	163	213	131	351	402	114			
1969	164	197	120	148	170	115	144	176	122				419	464	110			
1970	177	198	112	174	192	110	189	210	111				411	450	110	335	481	144
1971	233	259	111	—	—	—	265	295	111									
1972	153	173	113	172	190	111	199	230	116				350	385	110			
1973	190	210	110	278	303	109	307	341	111	369	422	114	464	502	108	396	469	118
1974	—	—	—	—	—	—	—	—	—									
1975	282	315	112	212	229	108	—	—	—				396	429	108	251	324	129
1976	201	224	112	162	176	108	169	203	120	199	253	127	413	452	109	276	334	121

поправкой на смачивание, на 50—80 %, а в отдельных случаях — в 2 раза и более. Эта разница по абсолютному значению тем больше, чем восточнее расположена станция. Наибольшие различия характерны для станции Нижнее Изголовье.

Причиной указанных различий является недоучет при исправлении только поправкой на смачивание значительного количества осадков, которые выдуваются из осадкомерного сосуда при сильных ветрах, характерных для рассматриваемых станций в зимние месяцы, особенно в ноябре и декабре. Интересно, что для станции Давша, которая расположена на подветренном берегу оз. Байкал, указанные различия составляют 25—30 %. При корректировке зимних осадков, измеренных на станциях Давша и Нижнее Изголовье, всеми видами поправок, вводимых в показания осадкомеров, годовые суммы исправленных осадков по станции Нижнее Изголовлье, расположенной на мысе, оказываются в ряде случаев даже больше полученных для станции Давша.

Таким образом, для оз. Байкал не выявлено тенденции уменьшения осадков на островных метеостанциях по сравнению с береговыми. Об этом же свидетельствуют результаты, полученные А. А. Натрус и И. А. Мухачевой, которые при расчете среднего для Байкала слоя атмосферных осадков по откорректированным данным не выявили тенденции уменьшения количества осадков над этим водоемом [116]. К аналогичным выводам пришел и В. Г. Булат, который исследовал режим осадков на Каховском и Кременчугском водохранилищах. По его данным, суммы осадков на островных и ближайших к ним береговых станциях этих водохранилищ практически равны [41].

В то же время в работах ряда советских и зарубежных исследователей отмечены факты уменьшения сумм осадков, измеренных на островных станциях, по сравнению с береговыми [52, 155]. Следовательно, при использовании данных береговых метеостанций для оценки среднего слоя осадков, выпадающих на поверхность крупного водоема, надо проявлять большую осторожность. Во многих случаях, особенно при сложных орографических условиях береговой зоны водоема, характер трансформации поля осадков при переходе с суши на водоем не позволяет прямо использовать данные береговых наблюдений (в том числе с использованием понижающего коэффициента) для оценки слоя осадков на акваторию водоема.

3.3. Подземный водообмен

3.3.1. Обоснование выделения характерных периодов формирования подземных вод

Элементы подземного водообмена играют в большинстве случаев подчиненную роль по отношению к другим элементам водного баланса водоемов. Тем не менее, их изучению в последние годы уделяют все более пристальное внимание. Особенно

повышенный интерес проявляют к изучению динамики подземных вод в береговой зоне водохранилищ.

Согласно существующим представлениям, подземные компоненты водного баланса водоемов подразделяют на подземные приток и отток и компонент, характеризующий изменение запасов подземных вод в грунтах берегов за расчетный интервал времени [52]. Соответственно первый компонент входит в приходную часть уравнения водного баланса, второй — в расходную, а третий относится к аккумуляционным составляющим. Следует отметить, что во многих публикациях данные об этих компонентах приведены без указания конкретных временных интервалов, за которые они получены. Это является безусловным недостатком, так как в разные годы подземный водообмен может иметь разные знаки из-за изменения уровенного режима водоема. Для большинства озер, имеющих достаточно стабильное положение уровня на протяжении длительного промежутка времени, режим подземных вод в береговой зоне мало меняется от года к году. Совершенно иное положение с водохранилищами.

Рассмотрим более подробно вопросы формирования режима грунтовых вод в районе водохранилища. При создании водохранилища на реке или канале на прилегающих к нему территориях условия движения подземных вод по сравнению с естественными изменяются. Под влиянием подъема горизонта воды при создании водохранилища естественный поток подземных вод изменяет свое направление, форму свободной поверхности, расход, глубину и скорость [92]. Кроме того, вблизи водохранилища и плотины появляются новые фильтрационные течения. Согласно существующим представлениям, во время наполнения водохранилища в берегах реки и под ее дном возникает область фильтрации из верхнего бьефа в нижний. При заполнении водохранилища и длительное время после этого область фильтрации из водохранилища изменяется: по мере заполнения водохранилища площадь ее увеличивается и спустя некоторый промежуток времени после заполнения достигает максимальных размеров. Эта область охватывает зону фильтрации из водохранилища в нижний бьеф через тело и основание плотины — A_1 и зону фильтрации из водохранилища в нижний бьеф через оба берега речной долины — A_2 (обходная фильтрация) (рис. 3.2). Граница между этими зонами проходит по линиям dp и d_1p_1. Естественный грунтовый поток отжимается фильтрационными течениями из водохранилища в сторону нижнего бьефа. Его можно разделить на две зоны — B и C, в которых течение грунтовых вод зависит от характера их связи с рекой и их расхода вдоль речной долины. После устройства и заполнения водохранилища движение грунтовых вод вблизи него длительное время имеет неустановившийся характер. В это время зоны A_1 и A_2 и зоны естественного потока B и C непрерывно изменяют свое положение и размеры. Зона A_1 в период заполнения водохранилища увеличивается до тех пор, пока под дном водохранилища не стабилизируется течение грунтовых вод, которое является на-

порным и подчиняется закономерностям упругого режима фильтрации. Зона A_2 при заполнении водохранилища также непрерывно увеличивается, однако напор и скорости фильтрации в этой зоне меньшие по сравнению с зоной A_1, так как здесь имеет место безнапорный режим фильтрации. Граница между зонами B и C в период заполнения водохранилища удаляется от плотины. При сезонной сработке и последующем наполнении водохранилища общая зона фильтрации и положение граничной линии изменяются: при сработке зона фильтрации уменьшается, при наполнении увеличивается.

Таким образом, при заполнении водохранилища под влиянием увеличивающегося напора в реке уровень грунтовых вод поднимается и относительно сухие грунты зоны аэрации насыщаются водой. Вследствие этого в районе водохранилища образуется окаймляющая его область подпора грунтовых вод и водонасыщения сухих грунтов, захватывающая зону береговой фильтрации A_2 и зоны естественного грунтового потока B и C. Зона подпора и водонасыщения пред-

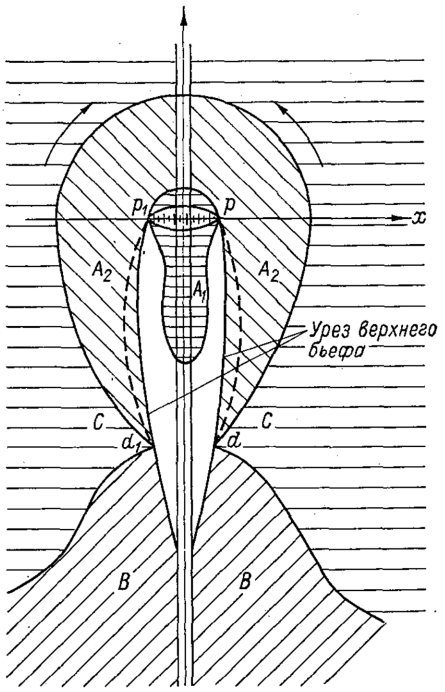


Рис. 3.2. Зоны фильтрации вблизи водохранилища [151].

ставляет собой своего рода подземное водохранилище, окружающее со всех сторон наземное. Характер водообмена между подземным и наземным водохранилищами и будет определять роль подземных компонентов в водном балансе последнего. При заполнении водохранилища область подпора грунтовых вод распространяется в пласте весьма быстро и доходит до внешних границ грунтового потока. Однако ощутимый подъем уровня подземных вод наблюдается не во всей области распространения подпора, а лишь в ее части, прилегающей к водохранилищу. Вопрос о предельной границе распространения подпора весьма важен, так как этот показатель широко используют при расчетах характеристик водообмена грунтовых вод в береговой зоне водохранилища. По данному вопросу имеются различные точки зрения. Некоторые авторы предлагают считать предельной границей распространения подпора подземных вод от водохранилища линию, где подпор в условиях установившегося движения

равен половине размаха естественных колебаний уровня грунтовых вод [151].

В практике проектирования водохранилищ зону подтопления ограничивают линией, где уровни грунтовых вод залегают на глубине 1 м и менее от поверхности [78, 79]. Г. А. Разумов в качестве границы зоны влияния водохранилища на режим подземных вод принимает условную линию, где подъем уровня подземных вод за счет влияния водохранилища составляет не менее 0,5 м [123]. Для разных водохранилищ ширина области подпора и водонасыщения различна и может изменяться от нескольких метров до десятков километров.

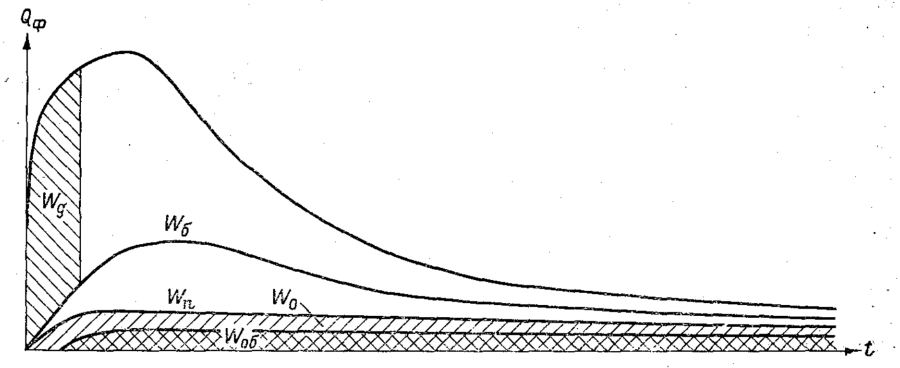


Рис. 3.3. Кривые, характеризующие изменение различных видов фильтрационных потерь из водохранилища во времени [151].

Уменьшение подземного питания реки и увеличение фильтрации из нее при устройстве водохранилища в сумме составляют потери на фильтрацию. В первые годы работы водохранилища эти потери могут быть более 50 % годового стока, особенно при создании водохранилищ на малых реках.

С точки зрения воднобалансовых расчетов, важно знать, какие виды фильтрационных потерь формируются в течение всего времени существования водохранилища. Ответ на этот вопрос дает график, приведенный на рис. 3.3. В период заполнения водохранилища потери формируются за счет расхода воды на насыщение дна ($W_д$), берегов водохранилища ($W_б$) и вследствие уменьшения его питания естественным грунтовым потоком ($W_п$). После окончания заполнения водохранилища суммарные потери на фильтрацию в течение длительного промежутка времени уменьшаются. Сначала они формируются в основном за счет расхода воды на насыщение берегов ($W_б$) и расхода, теряемого вследствие уменьшения грунтового питания водохранилища ($W_п$). С течением времени все большее значение начинают приобретать потери на фильтрацию в теле и основании плотины и в обход ее (W_0), а также в соседние речные долины ($W_{0_б}$). После стабилизации движения фильтрационных и грунтовых вод суммарные потери

формируются за счет уменьшения грунтового питания ($W_п$) и расходов воды на фильтрацию в нижний бьеф (W_0) и в соседние речные долины ($W_{0_б}$).

Помимо указанных выше потерь при определенных гидрометеорологических и гидрогеологических условиях могут иметь место расходы фильтрационных вод, связанные с увеличением испарения грунтовых вод при их близком залегании к поверхности или с увеличением глубинного стока подземных вод через ложе пласта, обусловленного повышением гидродинамических напоров.

В связи с изложенным очевидно, что элементы подземного водообмена водохранилищ надо рассчитывать с учетом той или иной стадии развития процесса взаимодействия потока фильтрующихся из водохранилища вод с грунтовым потоком, формирующимся в его бассейне. Предложено в соответствии с изложенной схемой при выполнении воднобалансовых расчетов различать три периода, в течение которых режим подземных вод в районе водохранилища имеет характерные особенности: 1) период заполнения водохранилища, когда происходит интенсивная фильтрация в дно и берега водохранилища; 2) период начала эксплуатации водохранилища, в течение которого стабилизируется движение фильтрационных и грунтовых вод и 3) период эксплуатации водохранилища в условиях установившегося режима грунтовых вод в его береговой зоне.

К сожалению, имеющиеся в настоящее время немногочисленные данные о характеристиках подземного водообмена водохранилищ, полученные при выполнении воднобалансовых расчетов, в большинстве своем даны без учета периода развития водохранилища [41, 129, 136]. В монографии З. А. Викулиной [52] также приведены данные о подземном притоке к водохранилищам и оттоке из них для средних многолетних условий без какого-либо указания, для каких характерных стадий формирования подземного водообмена они получены. По всей вероятности, эти данные относятся к периоду эксплуатации водохранилища в условиях установившегося режима подземных вод. В противном случае приведенная информация теряет смысл.

Выполненные к настоящему времени детальные гидрогеологические исследования по изучению особенностей формирования режима подземных вод в береговой зоне водохранилищ Волжского и Днепровского каскадов [120] позволяют сделать следующие выводы относительно методологии оценки характеристик подземного водообмена в районе создания водохранилищ.

1. В период заполнения водохранилища оценка элементов подземного водообмена весьма затруднена, что связано с большими сложностями, возникающими при организации наблюдений за элементами подземного водообмена в условиях постоянного роста уровня водохранилища. Как правило, для оценки фильтрации в этих условиях используют косвенные приемы. Очевидно, что

в период заполнения водохранилища имеющий место отток подземных вод за счет фильтрации в дно и берега входит в расходную часть уравнения водного баланса.

2. В расходную часть баланса следует также включать элементы подземного водообмена, формирующиеся в период с момента заполнения водохранилища до достижения установившегося режима подземных вод в береговой зоне водохранилища. Продолжительность этого периода различна и зависит от размеров водохранилища, гидрогеологических условий в районе водохранилища и режима его эксплуатации. Выполненные исследования показывают, что для крупных равнинных водохранилищ этот период может длиться 7—15 лет [64, 127].

3. Последняя характерная стадия формирования подземного водообмена наступает после достижения установившегося режима подземных вод в береговой зоне водохранилища. В этот период в зависимости от особенностей взаимодействия потоков подземных вод в зоне выклинивания подпора от водохранилища может устанавливаться подземный водообмен различного характера. В большинстве случаев кривая депрессии имеет наклон к водохранилищу, и подземные воды питают его. Следовательно, в уравнении водного баланса подземный водообмен будет иметь положительный знак. Если же кривая депрессии имеет наклон от водохранилища, то должен быть отток подземных вод, который в уравнении водного баланса надо учитывать со знаком минус.

Подводя итог сказанному, еще раз надо подчеркнуть весьма важную особенность формирования подземного водообмена в береговой зоне водохранилища: в различные периоды его существования этот элемент уравнения водного баланса может иметь разные знаки. Поэтому нельзя говорить о средних многолетних значениях данной составляющей, как это нередко бывает при расчетах водных балансов водохранилищ. Можно говорить лишь об интегральном ее значении за рассматриваемый период, который может включать в себя годы как с положительным, так и с отрицательным подземным водообменом. Особого внимания заслуживает вопрос о сезонных и более кратковременных изменениях характера подземного водообмена в приурезной части водохранилища при колебаниях его уровня.

В литературе этот вопрос освещен явно недостаточно. К настоящему времени выяснено, что сезонные, декадные и суточные колебания уровня воды в водохранилище приводят к периодическим изменениям характера подземного водообмена в приурезной его части, что отражается на ходе уровня подземных вод. Установлено, что ширина зоны сезонных колебаний уровней подземных вод зависит от характера водопроводимости пласта и может достигать 3 км и более от уреза водохранилища. Указанную особенность подземного водообмена приурезной части водохранилища при колебаниях уровня воды в нем необходимо учитывать при расчетах сезонных и месячных водных балансов водо-

хранилищ, характеризующихся большим размахом колебаний уровенной поверхности и имеющих берега, сложенные легкопроницаемыми и трещиноватыми породами.

3.3.2. Методы оценки составляющих подземного водообмена

Те или иные расчетные методики применяют в зависимости от того, для какой из трех указанных в п. 3.3.1 стадий развития подземного водообмена осуществляют воднобалансовые расчеты. В период заполнения водохранилища такие расчеты связаны со значительными трудностями из-за весьма скудной в большинстве случаев исходной информации. Существуют аналитические решения такой задачи, предложенные, например, в монографии [151], однако для их реализации необходимы данные о коэффициенте фильтрации грунта, пьезопроводности пласта, мощности грунтового потока, расходе грунтовых вод, которые, как правило, отсутствуют. Поэтому часто в таких случаях используют косвенные приемы. Так, например, С. Д. Рубан оценивала фильтрацию в нижний бьеф Цимлянского гидроузла в период заполнения водохранилища путем удвоения объемов воды, полученных на основании измерения расходов воды в отводящих канавах глубинного дренажа, заложенного вдоль плотины [129]. По данным С. Д. Рубан, полученным таким путем, объем фильтрации в створе плотины Цимлянского гидроузла в 1954 г. составил 0,4 км^3 (около 1 % суммарного сброса через водопропускные отверстия).

Для оценки фильтрационных потерь из водохранилища в дно и береговую зону в течение второго характерного периода (от достижения отметки НПУ до формирования установившегося движения грунтовых вод) предложены различные методические приемы [18, 49]. Выполненный анализ показал, что для воднобалансовых расчетов за конкретный период времени (год, месяц) объем этих потерь надо рассчитывать балансовым путем по разности запасов подземных вод в зоне формирования подпора в начале и конце расчетного периода. Расчеты запасов подземных вод на определенный момент времени определяют путем умножения объема водонасыщенной толщи на коэффициент водоотдачи пород.

Для того чтобы определить объем водонасыщенной толщи, необходимы данные о средней ее мощности в пределах территории, ограниченной зоной распространения подпора подземных вод. Эти данные могут быть получены как на основании изучения литературных источников, так и в результате проведения специальных гидрогеологических работ в районе водохранилища. Границы зоны распространения подпора грунтовых вод могут быть определены по данным непосредственных наблюдений, как это было сделано при проведении комплексных гидрогеологических исследований по оценке влияния водохранилищ Волжского и Днепровского каскадов на изменение режима, ресурсов и запасов подземных вод [120]. В связи с тем, что такие работы носят ограниченный

характер, фильтрационные потери подземных вод за текущие интервалы времени (год, месяц) при воднобалансовых расчетах в большинстве случаев не определяют. Чаще всего рассчитывают фильтрационные потери в берега и ложе водохранилища за весь период от начала заполнения водохранилища до формирования установившегося режима подземных вод в его береговой зоне.

Автор совместно с С. В. Завилейским предложил методику расчета фильтрационных потерь в береговую зону водохранилища, основанную на анализе фактических данных по формированию подпора подземных вод, теоретических разработок и результатов моделирования процесса геофильтрации на электроаналоговых моделирующих установках [60, 82].

Методику можно использовать для оценки фильтрационных потерь как в первую выделенную стадию режима подземных вод (до достижения отметки НПУ), так и в целом за первую и вторую стадии, т. е. от начала заполнения водохранилища до формирования установившегося движения грунтовых вод. Методика разработана для крупных водохранилищ равнинной части СССР и детально изложена в п. 8.1.2, где рассмотрены методы оценки влияния крупных водохранилищ СССР на водные ресурсы рек. Ведь потери на фильтрацию фактически являются потерями речного стока, за счет которого заполняется водохранилище.

Для третьей стадии, которая наступает после того, как в процессе эксплуатации водохранилища движение грунтовых вод приобретает установившийся характер, элементы подземного водообмена определяют расчетными методами с учетом характера взаимосвязи потоков подземных вод в береговой зоне водохранилища. При этом используют результаты специальных гидрогеологических наблюдений, без которых данную задачу решить почти невозможно. Когда подземные воды питают водохранилище, для расчета часто используют уравнение Дюпюи

$$Q_г = K_ф B \left(H^2 - \Delta H^2\right)/(2l), \tag{3.12}$$

где $Q_г$ — суммарный расход грунтовых вод, поступающих в водохранилище; $K_ф$ — коэффициент фильтрации; B — ширина потока грунтовых вод; H — толщина водоносного пласта на верхней границе зоны депрессии; ΔH — превышение поверхности воды в водохранилище над водоупором; l — расстояние от водохранилища до верхней границы зоны депрессии, или радиус депрессии.

Когда происходит отток подземных вод из водохранилища, наиболее часто применяют уравнение Дарси

$$Q_г = BHK_ф (H_1 - H_2)/l, \tag{3.13}$$

где H_1 и H_2 — соответственно отметки уровня воды в двух сечениях, расположенных по длине потока на расстоянии l.

Данную формулу применяют в условиях равномерного движения грунтовых вод, когда сечения потока постоянные при движении вод по однородному водопроводящему пласту. Формулы (3.12)

и (3.13) предназначены для определения расхода грунтовых вод в пределах единичного сечения.

Суммарный приток (или отток) подземных вод к водохранилищу рассчитывают с использованием карт гидроизогипс и данных о толщине водоносного пласта и значениях коэффициента фильтрации для разных районов береговой зоны водохранилища. По этим данным составляют карты гидрогеологического районирования с усредненными расчетными параметрами, на основании которых определяют значения элементов подземного водообмена для водохранилища в целом. Формулы (3.12) и (3.13) позволяют выполнять расчеты для простейших условий формирования грунтового потока. В более сложных случаях (неоднородный пласт, неравномерное движение грунтовых вод и др.) надо применять более сложные зависимости, однако для таких расчетов необходим большой объем натурного материала, который, как правило, отсутствует.

3.4. Испарение

3.4.1. Существующие методы определения испарения

В настоящее время для практической оценки испарения с водоемов предложены различные методы, однако их общим недостатком является низкая точность. Это связано, с одной стороны, с ограниченным применением строгих физических подходов при оценке испарения в точке из-за невозможности прямо определить многие необходимые при таком роде расчетов исходные данные, а с другой — со сложностью пересчета значений испарения, полученных для отдельных точек, на водоем в условиях значительной изменчивости процессов тепловлагопереноса по акватории водоема.

Единственным способом, позволяющим сразу получить интегральное значение испарения с водоема без необходимости осреднения полей тех или иных элементов тепло- или влагообмена, является метод расчета испарения из уравнения водного баланса. Этот метод можно применять при расчетах среднего многолетнего годового и месячного испарения с водохранилищ в тех случаях, когда абсолютные значения испарения сопоставимы с другими составляющими водного баланса. При расчетах за конкретные годы и тем более месяцы использование этого метода существенно ограничено, так как невозможно соблюдать главное условие его применения — надежность определения всех остальных элементов водного баланса, в том числе и таких трудно учитываемых, как подземный водообмен, конденсация, изменение запасов воды в водохранилище под влиянием хозяйственной деятельности и т. д.

Далее рассмотрены методы оценки испарения, имеющие наибольшее применение в воднобалансовых расчетах.

3.4.1.1. Методы, основанные на учете потоков тепла и влаги в приводном слое

Среди методов, основанных на учете потоков тепла и влаги в приводном слое, чаще всего применяют методы теплового баланса

и турбулентной диффузии. Для оценки испарения с водохранилищ, особенно речного типа, более целесообразно применять первый из этих методов. Расчет осуществляют по следующей зависимости:

$$E = 0{,}615 \cdot 10^{-2}(R - \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_г)/(1{,}55 + \Delta t/\Delta e), \quad (3.14)$$

где R — радиационный баланс, Дж/см^2; ΔS_1 — изменение теплозапаса водной массы за расчетный интервал времени, Дж/см^2; ΔS_2 — разница между поступлением тепла с притоком воды в водохранилище и удалением тепла со стоком воды из него, Дж/см^2; $\Delta S_г$ — теплообмен с грунтом дна водоема, Дж/см^2; Δt — разность температуры воды и воздуха, °С; $\Delta e = (e_0 - e_2)$ — разность парциального давления водяного пара у поверхности воды и на высоте 2 м над ней, гПа.

Преимущества использования метода теплового баланса для оценки испарения с речных водохранилищ заключаются в следующем.

1. Расчет ведут с учетом тепловых потоков, поступающих в водоем с притоком и теряемых со стоком из него. Это весьма важно, так как в отличие от озер большинство водохранилищ обладают значительной проточностью (см. п. 4.3). Этот фактор нельзя не учитывать, так как при прохождении через водохранилище больших объемов речных вод температура поверхности воды будет в значительной мере определяться температурным режимом транзитных потоков, а не только гидрометеорологическими условиями и внутриводоемными процессами. Этот вывод сделан в результате специального исследования влияния степени проточности водохранилища на условия формирования температуры воды в нем. Детально этот вопрос рассмотрен в п. 4.3.1.

2. Для выполнения расчетов по уравнению (3.14) достаточно располагать стандартной сетевой гидрометеорологической информацией и данными о радиационном балансе водной поверхности. Исследования А. П. Браславского показали [38], что разница между радиационным балансом суши и прилегающей водной поверхности для месяцев теплового периода не превышает 5 %, т. е. использование данных по радиационному балансу суши не может привести к существенным погрешностям при расчете по зависимости (3.14).

Некоторые сложности при использовании уравнения теплового баланса связаны с расчетом $\Delta S_г$. Этот параметр невозможно надежно определить без проведения весьма трудоемких специальных работ. Поэтому на практике им или пренебрегают, или применяют косвенные методы его оценки. При этом принимают во внимание тот факт, что вклад этого параметра в суммарный тепловой поток незначителен и составляет в большинстве случаев не более 1 % значения радиационного баланса.

Расчет испарения по методу турбулентной диффузии требует определения коэффициента турбулентного обмена. Несмотря на

Таблица 3.6

Расчет испарения с Рыбинского водохранилища по методу теплового баланса

Расчетный период	Слагаемые теплового баланса кДж/(см²·мес)				Средние для акватории гидрометеорологические элементы				Испарение, мм	
					температура, °С		парциальное давление водяного пара, гПа			
	R	ΔS_1	ΔS_2	$\Delta S_г$	поверхности воды	воздуха на высоте 2 м	у поверхности воды	на высоте 2 м	по расчету	по данным измерений
1961 г.										
VI	45,64	4,82	—1,09	—4,27	19,7	18,9	23,0	18,4	127	105
VII	38,53	9,97	—0,80	—3,27	20,0	18,9	23,4	19,9	81	86
VIII	29,73	—13,40	—2,01	—1,05	18,1	17,0	20,8	17,4	132	—
X	1,67	—8,33	—1,38	2,97	7,5	6,9	10,4	9,3	34	—
1962 г.										
VII	34,34	2,76	0,42	—3,27	18,3	17,2	21,0	17,5	95	104
VIII	23,87	—7,37	—2,93	—1,05	16,0	14,8	18,2	15,2	87	85
IX	8,79	—7,29	0,02	1,38	11,2	10,8	13,3	11,7	60	55
X	0,84	—15,33	—0,17	2,97	5,8	5,4	9,3	8,5	57	35
1963 г.										
VIII	30,99	—6,36	—4,61	—1,05	19,0	17,8	22,0	18,1	105	101
IX	10,89	—17,17	—3,35	1,38	14,8	13,9	16,8	14,4	84	75
X	1,26	—17,04	—0,80	2,97	6,4	5,6	9,1	8,6	40	31

Примечание. Измеренные значения испарения получены по данным плавучего испарителя ГГИ-3000, установленного в пункте ПОМ в центре Рыбинского водохранилища.

большое число формул, предложенных для оценки этого коэффициента, они не обеспечивают необходимой точности его определения для водохранилищ. Автор провел расчеты месячных значений испарения по уравнению теплового баланса (3.14) для ряда водохранилищ СССР. Эти расчеты подтвердили достаточную надежность данного метода. В качестве примера приведены результаты таких расчетов для Рыбинского водохранилища (табл. 3.6).

3.4.1.2. Расчет испарения по эмпирическим формулам

Для расчета испарения с водной поверхности широко распространены как в нашей стране, так и за рубежом эмпирические формулы. В подавляющем большинстве случаев они довольно просты и, что самое главное, основаны на использовании стандартной гидрометеорологической информации. В основе большинства эмпирических формул, предложенных для расчета испарения с водной поверхности, лежит учет выявленного Дальтоном факта пропорциональности испарения разности парциального давления водяного пара над этой поверхностью. Разнообразные расчетные зависимости, основанные на законе Дальтона, имеют следующую структуру:

$$E = b(e_0 - e_2)\varphi(\omega), \tag{3.15}$$

где $\varphi(\omega)$ — некоторая функция скорости ветра; b — коэффициент, суммарно учитывающий влияние на процесс испарения ряда других факторов, не входящих в формулу (3.15).

В СССР из формул данного вида чаще применяют формулы В. К. Давыдова [76], Б. Д. Зайкова [84], А. П. Браславского и З. А. Викулиной [34]. За рубежом используют формулы Хортона [175], Миллера [181], Пенмана [184, 185], Торнтвейта [189] и др.

В конце 60-х годов В. И. Кузнецов, В. С. Голубев и Т. Г. Федорова предложили формулу для расчета среднемесячного испарения с водной поверхности, вошедшую затем в указания [150]:

$$E = 0{,}14n(e_0 - e_2)(1 + 0{,}72\omega_2), \tag{3.16}$$

где n — число суток в месяце.

Данную формулу рекомендовано применять при равновесной стратификации, когда разность значений температуры воды и воздуха составляет 2—4 °С. При неравновесной стратификации атмосферы над водоемом расчетные формулы предложены В. А. Рымшей и Р. В. Донченко [133], А. П. Браславским и С. Н. Нургалиевым [34], В. П. Кожевниковым [92], Р. И. Гета [67] и В. С. Голубевым [70]. Структура формулы, предложенной Рымшей и Донченко, следующая:

$$E = 0{,}104n(e_0 - e_2)(K_{\Delta t} + \omega_2), \tag{3.17}$$

где $K_{\Delta t}$ — коэффициент, зависящий от разности температуры поверхности воды и воздуха.

Формула Браславского и Нургалиева имеет следующий вид:

$$E = 0{,}14n(e_0 - e_2)[1 + 0{,}8\omega_2 + \varphi(\Delta t)]. \qquad (3.18)$$

Похожую структуру имеют формулы Кожевникова, Гета и Голубева. Контрольные расчеты испарения, выполненные по всем указанным формулам, для 35 испарительных бассейнов и месячных интервалов времени показали, что наименьшую среднеквадратическую погрешность (12,5 %) имеет формула (3.16), которая и рекомендована в настоящее время в качестве расчетной [150].

Формула (3.18) непригодна для расчета испарения по месячным интервалам времени. Она, как правило, завышает значения испарения, особенно при неустойчивой стратификации атмосферы. Формулы Кожевникова, Гета, Голубева, которые здесь не рассмотрены, по данным работы [70], не имеют преимуществ перед формулой (3.17).

Для Бухтарминского и Краснооскольского водохранилищ и Валдайского озера были рассчитаны среднемесячные значения испарения по формулам (3.16) и (3.18). В расчетах использованы данные по парциальному давлению водяного пара и скорости ветра, полученные на плавучей установке, а результаты расчетов сравнены с показаниями плавучих испарительных бассейнов площадью 20 м^2. Отклонения рассчитанных по формуле (3.16) значений испарения от измеренных не превысили ± 25 %. Что касается использования формулы (3.18), то она систематически завышает значения испарения до 50 %.

Все упомянутые эмпирические формулы основаны на законе Дальтона, т. е. учитывают термодинамические аспекты испарения. Иной подход к расчетам испарения был развит В. И. Бабкиным [10]. Он рассматривал молекулярный механизм испарения. Впервые теоретические работы в этом плане были выполнены В. В. Шулейкиным, который для оценки максимальной и фактической скорости испарения предложил использовать уравнение Максвелла [163]. Однако полученные им формулы имели низкую точность. Бабкин показал, что уравнение Максвелла, описывающее распределение молекул идеального газа по скоростям, не подходит для описания распределения молекул воды по скоростям. Он предложил для расчета маскимальной и фактической скорости испарения ряд зависимостей, основанных на уточненных представлениях о молекулярной сущности испарения воды.

Следует отметить, что надежность расчетов по всем указанным эмпирическим формулам значительно зависит от надежности определения входящих в них элементов. Все элементы, входящие в эти расчетные формулы, должны быть определены для водной поверхности. Вследствие того, что в большинстве случаев такая информация отсутствует, при выполнении массовых расчетов по указанным формулам приходится использовать данные о метеоэлементах, полученных на континентальных станциях, с последующим пересчетом этих данных на водоем.

3.4.1.3. Метод испарителей. Современное состояние вопроса об оценке испарения с поверхности воды по данным испарительных установок различных типов

Метод основан на непосредственном определении слоя испарившейся влаги из испарительного прибора (z) за период между сроками наблюдений по разности отметок уровня воды на эти сроки (Δh) с учетом поступления осадков (x):

$$z = \Delta h - x. \tag{3.19}$$

Использование метода испарителей имеет богатую историю [77, 174, 191]. Наиболее тщательные исследования по применению испарителей для оценки испарения с водной поверхности были выполнены в Валдайском филиале ГГИ А. Р. Константиновым, В. И. Кузнецовым, В. С. Голубевым и др. [97, 98, 104]. Однако до настоящего времени вопросы теоретического обоснования перехода от показаний испарительных приборов к испарению с реальных водоемов во многом не решены.

Наибольшее количество информации накоплено на континентальной водноиспарительной сети с применением испарителей ГГИ-3000. Однако методика перехода от их показаний к испарению с водоема еще не разработана и не рассмотрена в опубликованных Указаниях по расчету испарения с поверхности водоемов [154]. Схемы расчета испарения с водоема по данным плавучих испарителей ГГИ-3000 и наземных испарительных бассейнов площадью 20 м², изложенные в Указаниях, имеют существенные погрешности. В связи с тем, что вопрос о переходе от показаний испарительных установок различных типов к реальному испарению с водной поверхности является весьма актуальным, наибольшее внимание должно быть уделено переходу от показаний наиболее массового прибора — наземного испарителя ГГИ-3000 к реальному водоему. Это необходимо также и потому, что длительное содержание на сети испарительных установок различных типов, на наш взгляд, нецелесообразно.

Очевидно, что измеренное в испарителе любой конструкции и любого размера испарение будет отличаться от среднего слоя испарения для всего водоема вследствие различия гидрометеорологической обстановки вблизи испарителя и на водоеме в целом и влияния конструктивных особенностей испарителя. При определении испарения с водоема по данным наблюдений на испарительных установках вводят поправки, учитывающие различие гидрометеорологической обстановки и конструктивные особенности испарителя. Эти же поправки вводят и при переходе от показаний одних испарительных приборов к другим. Следует отметить, что большинство работ в рассматриваемой области посвящено именно вопросам перехода от показаний наземных испарителей ГГИ-3000 к показаниям континентального водно-испарительного бассейна площадью 20 м² [98, 102, 103]. В то же время очень мало работ, в которых

рассмотрены пути перехода от показаний испарителей к реальному испарению с водоема [38, 127]. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

Для оценки различий в гидрометеорологической обстановке вводят так называемый гидрометеорологический коэффициент $K_{гм}$. Исходя из общей структуры формул для расчета испарения с водной поверхности этот коэффициент можно представить следующим образом:

$$K_{гм} = [c\omega(e_0 - e)]/[c'\omega'(e'_0 - e')], \qquad (3.20)$$

где в числитель входят параметры, характеризующие гидрометеорологические условия водоема (или места установки одного испарителя), а в знаменатель — то же для другого испарителя (соответственно ω и ω' — скорость ветра на высоте 2 м над водоемом и испарителем; e_0 и e'_0 — давление насыщенного водяного пара, определяемое по температуре воды в водоеме и испарителе; e и e' — средняя за расчетный интервал времени абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м над водоемом и испарителем; c и c' — коэффициент, учитывающий шероховатость подстилающей поверхности и температурную стратификацию атмосферы над водоемом и испарителем.

Введя дополнительные обозначения $K_c = c/c'$, $K_\omega = \omega/\omega'$, и $K_{\Delta e} = (e_0 - e)/(e'_0 - e')$ и подставив их в формулу (3.20), получим

$$K_{гм} = K_c K_\omega K_{\Delta e}. \qquad (3.21)$$

Для учета влияния конструктивных особенностей испарительных приборов вводят инструментальный коэффициент $K_и$, который определяют по выражению

$$K_и = E/(E' K_c K_\omega K_{\Delta e}), \qquad (3.22)$$

где E и E' — испарение с водной поверхности двух сравниваемых испарителей различной конструкции или водоема и испарителя.

Как отмечают А. П. Браславский и К. Б. Шергина [38], единственным правильным методом определения $K_и$ для системы водоем — испаритель является сравнение значений испарения с поверхности водоема, найденных независимым методом, с данными испарительного прибора после введения коэффициента $K_{гм}$. При использовании для этой цели данных наземных испарителей сложность в большинстве случаев состоит именно в определении гидрометеорологического коэффициента. Это связано с трудностями определения параметров, входящих в формулу (3.20).

Наиболее надежно значение инструментального коэффициента можно получить, сравнивая показания плавучей испарительной установки с реальным испарением с водоема в месте установки последней, когда значение гидрометеорологического коэффициента может быть принято равным примерно единице по причине равенства единице отдельных коэффициентов, входящих в формулу (3.21). Коэффициент K_ω можно принять равным 1, поскольку

скорость ветра измеряется на высоте 2 м, где влияние бортика испарителя на ветровой режим практически не сказывается. Вследствие единого характера температурной стратификации над водоемом и испарителем и несущественных различий в коэффициентах шероховатости подстилающей поверхности для водоема и испарителя в месте установки последнего, которые в значительной мере определяются скоростью ветра, коэффициент K_c также можно принять равным 1. Несколько сложнее дело обстоит с коэффициентом $K_{\Delta e}$. Вследствие некоторого различия температуры воды в испарителе и водоеме значения e_0 и e'_0 будут несколько различаться. По этой причине значения коэффициента $K_{\Delta e}$ характеризуются некоторой изменчивостью. Так, в соответствии с данными табл. 3.7, они могут изменяться для декадных интервалов времени от 0,92 до 1,08 и для месячных периодов от 0,94 до 1,07. В обоих случаях среднее

Таблица 3.7

Значения коэффициентов $K_{\Delta e}$ и $K_и$ для плавучего испарителя ГГИ-3000

Год	Месяц	Декада	$E_в$	$E'_п$	$e_0 - e$	$e'_0 - e'$	$K_{\Delta e}$	$K_и$
			Краснооскольское водохранилище					
1967	VIII	1	50	62	14,9	15,4	0,97	0,83
		2	53	66	11,7	12,1	0,97	0,83
		3	45	52	10,6	10,7	0,99	0,87
		за месяц	148	186	12,4	12,7	0,98	0,82
1972	X	1	21	27	5,6	5,8	0,96	0,81
		2	7	10	2,5	2,6	0,96	0,73
		3	14	17	3,3	3,4	0,97	0,85
		за месяц	42	54	3,8	3,9	0,97	0,80
1973	V	1	23	27	5,4	5,0	1,08	0,79
		2	36	41	7,7	7,3	1,05	0,83
		3	32	35	6,6	6,4	1,03	0,89
		за месяц	91	103	6,6	6,2	1,06	0,83
1974	VII	1	44	48	10,3	10,4	0,99	0,93
		2	38	43	10,4	10,7	0,97	0,91
		3	52	64	13,4	13,3	1,01	0,81
		за месяц	134	155	11,5	11,5	1,00	0,86
			Бухтарминское водохранилище					
1970	VI	1	21	31	6,8	6,6	1,03	0,66
		2	15	27	7,7	7,5	1,03	0,54
		3	30	41	10,6	10,6	1,00	0,73
		за месяц	66	99	8,4	8,2	1,02	0,65
	VII	1	30	39	8,5	8,3	1,02	0,61
		2	37	45	10,4	10,1	1,03	0,80
		3	28	36	8,2	8,1	1,01	0,77
		за месяц	95	120	9,0	8,8	1,02	0,77
	VIII	1	35	47	10,0	10,2	0,98	0,76
		2	27	41	10,4	10,9	0,95	0,69
		3	39	51	9,8	10,3	0,95	0,80
		за месяц	101	139	10,1	10,5	0,96	0,76

значение этого коэффициента можно принять равным 1. Данный вывод подтверждается всеми имеющимися материалами параллельных наблюдений на плавучих испарителях ГГИ-3000 и водоеме. Таким образом, с учетом изложенного для плавучего испарителя ГГИ-3000 значение коэффициента $K_{\Delta e}$ можно принять равным 1. В этом случае формула (3.22) упрощается:

$$K_и = E/E', \tag{3.23}$$

и задача определения инструментального коэффициента состоит в том, чтобы определить реальное испарение E в месте установки плавучего испарительного прибора.

В настоящее время известно, что единственным прибором, характеризующим реальное испарение с воды в месте его установки, является плавучий испарительный бассейн площадью 20 м² [33, 39]. Другими словами, инструментальный коэффициент для этого прибора равен единице. Таким образом, правомерно оценивать значение E по формуле (3.23) по показаниям этого прибора. Значения инструментальных коэффициентов для плавучего испарителя ГГИ-3000 были определены за декаду и месяц по формуле (3.22) с использованием большого числа данных наблюдений по испарительным бассейнам площадью 20 м², установленным на Красноосколькском и Бухтарминском водохранилищах. Полученное среднее значение коэффициента оказалось равным 0,80. О тесной функциональной связи данных наблюдений за испарением по плавучему испарителю ГГИ-3000 и плавучему испарительному бассейну площадью 20 м² свидетельствует то, что коэффициент корреляции этой связи оказался равным 0,98. Инструментальный коэффициент для плавучего испарителя ГГИ-3000, равный 0,8, был получен также В. И. Кузнецовым по результатам исследований, выполненных в 1975—1976 гг.

Таким образом, с учетом изложенного можно констатировать, что при расчете испарения с водоема в месте установки плавучего испарительного прибора за декаду и месяц достаточно в показания испарителя ввести переходный инструментальный коэффициент. Следует отметить, что в соответствии с Указаниями [150], испарение с водоема в месте установки плавучего испарителя ГГИ-3000 рекомендуется определять по формуле

$$E_в = 0{,}88E'_п K_{\Delta e}, \tag{3.24}$$

где $E'_п$ — испарение по плавучему испарителю ГГИ-3000.

Поскольку $K_{\Delta e} = 1$, то значение $K_и$ для этого прибора по формуле (3.24) оказывается равным 0,88. Это различие коэффициентов связано с тем, что при определении $K_и$ по формуле (3.24) за эталон принимали плавучий испарительный бассейн площадью 3 м², который не характеризует реальное испарение с водоема в месте его установки. По данным, полученным путем сравнения показаний трехметрового испарительного бассейна с показаниями

плавучего испарительного бассейна площадью 20 м², коэффициент $K_и = 0{,}86$.

Согласно В. С. Голубеву и А. П. Урываеву [72], формула для перехода от показаний плавучего испарителя ГГИ-3000 к испарению с водоема в месте его установки должна иметь следующий вид:

$$E = 0{,}8E_{0,3}\Delta e, \tag{3.25}$$

то есть эти авторы считают необходимым учет различий в значениях влажности воздуха над испарителем и водоемом в месте установки испарителя. Эти различия оценены на основании анализа коэффициентов $K_{\Delta e}$, рассчитанных для 108 декадных и 16 месячных интервалов времени на примере Краснооскольского и Бухтарминского водохранилищ. Среднее значение коэффициента $K_{\Delta e} = 1{,}01$. В мае и июне значения коэффициента $K_{\Delta e}$ оказались в большинстве случаев на 0,02—0,03 меньше 1, а в сентябре и октябре на 0,05—0,08 больше 1. Таким образом, при расчете по формуле (3.25) с постоянным коэффициентом $K_{\Delta e} = 1$ возможно некоторое завышение (на 2—3 %) значений испарения в весенний период и некоторое занижение (на 6—8 %) — в осенний. Однако для массовых расчетов такие погрешности несущественны.

Для того чтобы рассчитать слой испарения со всего водоема, необходимо полученное по формуле (3.25) значение испарения умножить на отношение β/α, где β и α коэффициенты, позволяющие учитывать различия между длиной разгона воздушного потока над водоемом и длиной разгона до места установки испарителя (более подробно о вычислении коэффициентов β и α упомянуто в Указаниях [150]).

Значительно сложнее задача перехода от показаний наземных испарительных установок к испарению с водоема. В этом случае обязательным является введение коэффициента $K_{гм}$, для определения которого необходимо иметь данные наблюдений за скоростью ветра и абсолютной влажностью воздуха над сушей и водоемом, а также за температурой поверхности воды в наземном испарительном приборе и водоеме. Кроме того, необходимо оценить коэффициенты c и c' для условий суши и воды, что представляет собой довольно трудную задачу. Следует также иметь в виду, что стенки и дно плавучих и наземных испарителей соприкасаются с различными средами (вода или почва), вследствие чего характер теплообмена через эти конструктивные детали прибора для наземных и плавучих установок будет разным. Всеми указанными обстоятельствами и объясняется тот факт, что до недавнего времени не были разработаны практические приемы пересчета показаний наземных испарителей на реальный водоем.

Методические подходы к решению данного вопроса предложены автором в 1978 г. и опубликованы в работе [61]. Их детальному изложению посвящен следующий пункт. Здесь же надо указать на работы В. С. Голубева, который для оценки испарения с водоемов

площадью до 1000 км² по данным наземных испарителей ГГИ-3000 предложил использовать следующее выражение [70]:

$$E = 0{,}43E_{0,3} + 0{,}9h_{\odot} - 1{,}2\Delta h_{\odot} + 2{,}4\tau - 8{,}1\Delta\tau - 35, \quad (3.26)$$

где $h_{\odot}$ и $\Delta h_{\odot}$ соответственно полуденная высота Солнца 15-го числа месяца и ее приращение за этот месяц; τ и $\Delta\tau$ — продолжительность светлого времени суток 15-го числа месяца и ее приращение за месяц в часах.

Погрешности расчета среднемесячных значений испарения по формуле (3.26) для ряда крупных озер и водохранилищ СССР, согласно работе [72], за летние месяцы не выходили за пределы ± 10 %, а весной и осенью достигали 25 % и более.

3.4.2. Предлагаемая методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземных испарителей ГГИ-3000

Основное распространение на водноиспарительной сети СССР получил наземный испаритель ГГИ-3000, данные которого надо использовать в первую очередь для оценки испарения с реального водоема. В связи с тем, что по конструкции наземный и плавучий испарители ГГИ-3000 одинаковы, инструментальный коэффициент для них также одинаков. В этом случае с учетом выражения (3.22) формула для расчета испарения с плавучего испарителя ГГИ-3000 по данным наземного испарителя аналогичной конструкции будет иметь следующий вид

$$E'_{\text{п}} = E'_{\text{н}} K_c K_{\omega} K_{\Delta e}, \quad (3.27)$$

где $E'_{\text{н}}$ — испарение по наземному испарителю ГГИ-3000.

Рассмотрим подробнее произведение коэффициентов $K_c K_{\omega} = c\omega/(c'\omega')$. Коэффициенты c и c' учитывают шероховатость подстилающей поверхности и температурную стратификацию атмосферы. Поскольку для теплого периода года в основном характерны равновесные условия атмосферы над водоемом и сушей [147], когда отсутствует локальный барический градиент, а турбулентный обмен над водной поверхностью существенно ослаблен, эти коэффициенты будут в первую очередь зависеть от шероховатости поверхности суши и воды. Подтверждение данного положения можно найти в работе [97], где указано, что расчеты испарения с водной поверхности в большинстве случаев можно выполнять без учета влияния температурной стратификации атмосферы. Таким образом, коэффициент K_c в формуле (3.27) зависит в основном от соотношения значений шероховатости подстилающей поверхности суши и воды. Второй коэффициент K_{ω} определяется соотношением скоростей ветра над плавучим и наземным испарителями ГГИ-3000. При этом следует иметь в виду, что скорость ветра в приземном слое самым тесным образом связана с шероховатостью подстилающей поверхности [92, 147]. С учетом

изложенного высказано предположение о достаточном постоянстве отношения $c\omega/c'\omega'$ для определенной станции и одного типа испарительных приборов. Оно было подтверждено материалами водно-испарительной сети, используя которые, обратным путем из выражения (3.27) получили среднемесячные значения произведения $K_c K_\omega$ для 10 станций. Полученные данные, часть которых приведена в табл. 3.8, подтвердили достаточную устойчивость этого произведения для каждой отдельной станции. На основании этого

Таблица 3.8

Значения $K_c K_\omega = c\omega/c'\omega'$ для испарителей ГГИ-3000, определенные для ряда водоемов СССР

Год	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Бухтарминское водохранилище — с. Селезневка								
1968				1,23		1,17		
1969				1,28	1,18	1,22		
1970			1,22	1,17	1,19	1,11		
оз. Часкак — с. Часкак								
1961	0,99	0,90	0,95	0,96	0,96	1,00	1,14	0,91
1963	1,03	0,92	0,77	0,78	0,74	0,76	0,79	0,87
1964	0,86	0,79	0,79	0,83	0,88	0,91	0,96	1,02
1965	0,90	0,84	0,87	0,87	0,88	0,88	0,86	0,88
1966	0,89	0,85	0,82	0,78	0,74	0,70	0,81	0,73
оз. Нарочь — пгт Нарочь								
1971		1,11	1,19	1,28	1,17	1,22	1,30	
1972				1,39	1,18	1,18	1,22	
1973		1,09	1,32	1,31	1,32	1,19	0,99	

высказано предположение о существовании достаточно тесной связи между отношением $E'_п/E'_н$ и $K_{\Delta e}$. Это предположение проверено на материалах фактических наблюдений. Для этой цели привлечены независимые данные наблюдений 23 водно-испарительных станций, расположенных в различных районах СССР. Теснота связи между декадными значениями отношения $E'_п/E'_н$ и $K_{\Delta e}$ оценена методом парной линейной корреляции. Коррелированные ряды содержали по 550 членов. Коэффициент корреляции оказался равным 0,75, что свидетельствует о достаточно тесной связи рассматриваемых аргументов. Для того чтобы выявить характер связи между $E'_п$, $E'_н$ и $K_{\Delta e}$, были использованы многочисленные материалы наблюдений по плавучим и наземным испарителям ГГИ-3000 за период 1953—1975 гг. Рассмотрены месячные интервалы времени. Обобщение этих данных позволило составить расчетную номограмму для определения месячных значений испарения с плавучего испарителя ГГИ-3000 по данным об испарении, измеренном по наземному испарителю аналогичной конструкции, и коэффициенту $K_{\Delta e}$ (рис. 3.4).

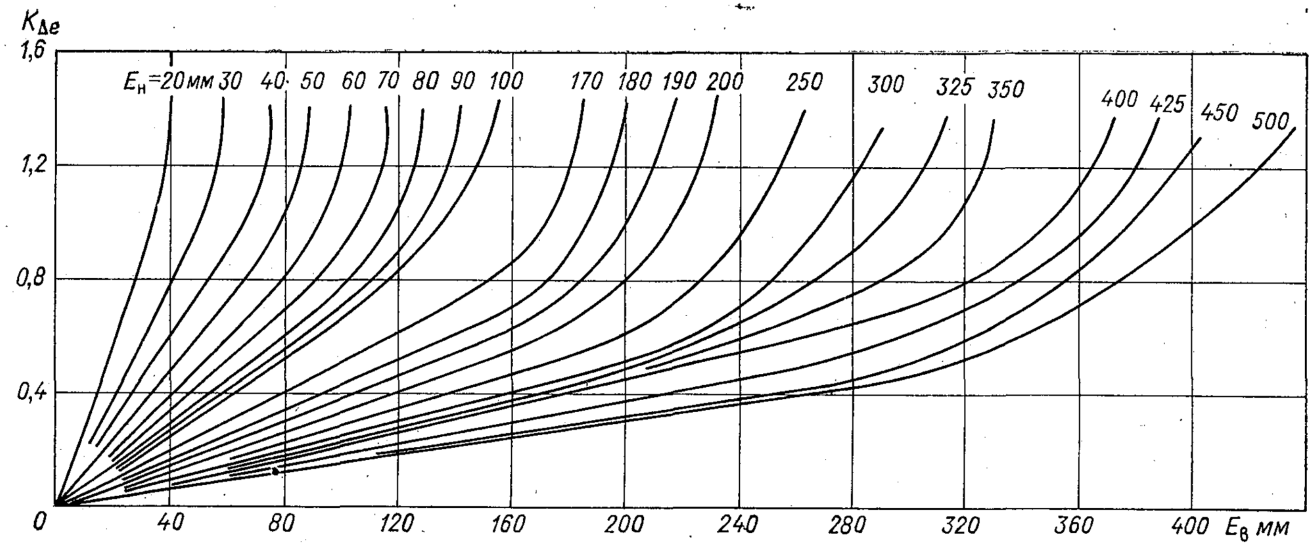


Рис. 3.4. Номограмма для определения месячных сумм испарения с плавучего испарителя ГГИ-3000 ($E_в$) в зависимости от суммы испарения с наземного испарителя аналогичной конструкции ($E_н$) и значений коэффициента $K_{\Delta e}$.

В выражение для определения коэффициента $K_{\Delta e}$ входят абсолютная влажность воздуха на наземной $e_н$ и плавучей $e_п$ установках и давление насыщенного водяного пара, определенное по температуре воды в плавучем $e_{0_п}$ и наземном $e_{0_н}$ испарителях:

$$K_{\Delta e} = (e_{0_п} - e_н)/(e_{0_н} - e_н). \quad (3.28)$$

Надо обратить внимание на следующее обстоятельство. Как известно, для определения $e_п$ можно использовать следующую формулу из Указаний [150]:

$$e_п = e_н + (0{,}8e_{0_н} - e_н) M_б, \quad (3.29)$$

где $M_б$ — коэффициент трансформации воздушной массы при ее переходе с берега к месту установки плавучего испарителя.

В связи с тем, что плавучие испарительные установки располагают, как правило, на расстоянии 100—150 м от берега, в соответствии с Указаниями [150] значения осредненного коэффициента трансформации для таких разгонов будут $M_б = 0{,}02$. При подстановке этого значения в формулу (3.29) получают

$$e_п = e_н + (0{,}8e_{0_н} - e_н)\,0{,}02 = 0{,}98e_н + 0{,}016e_{0_н} \approx e_н. \quad (3.30)$$

Следовательно, коэффициент $K_{\Delta e}$, полученный по зависимости (3.28) и использованный при составлении номограммы, может быть получен по более простой зависимости

$$K_{\Delta e} = (e_{0_п} - e_н)/(e_{0_н} - e_н). \quad (3.31)$$

В этом случае достаточно иметь данные только наземных испарителей и располагать информацией о температуре поверхности воды в прибрежной зоне для определения $e_{0_п}$. Как показывают наблюдения, различия в месячных значениях температуры поверхности воды в плавучем испарителе ГГИ-3000 и водоеме в месте установки испарителя незначительные и составляют не более чем $\pm 0{,}3$ °С. Подобные различия не могут существенно влиять на результаты расчетов по формуле (3.31) при определении $e_{0_п}$ по температуре поверхности воды в прибрежной зоне.

Таким образом, последовательность операций при определении месячных значений испарения с поверхности водоема в береговой зоне по данным наземного испарителя ГГИ-3000 следующая:

1) определение температуры поверхности воды в береговой зоне по методу аналогии или расчетным путем;

2) расчет $K_{\Delta e}$ по формуле (3.31);

3) определение испарения $E'_п$ по плавучему испарителю ГГИ-3000 по номограмме (см. рис. 3.4);

4) определение испарения с водоема в береговой зоне по формуле (3.23) при $K_и = 0{,}8$.

Недостатком изложенной расчетной схемы является трудность определения температуры воды в береговой зоне при отсутствии специальных наблюдений. Кроме того, в большинстве случаев тре-

буется определить среднее значение испарения для всего водоема, а не для его береговой зоны. В этом случае при определении $K_{\Delta e}$ нельзя использовать формулу (3.31), так как она выведена при условии, что осредненный коэффициент трансформации $M_б = 0{,}02$. При расчете среднего значения испарения в целом для водоема необходимо использовать осредненное значение коэффициента трансформации для всей протяженности водной поверхности $M_{б.\,ср}$ [28, 30]. В работе [61] значение этого коэффициента применительно к расчету испарения в целом для водоема принято $M_{б.\,ср} = 0{,}25$. Правомерность такого решения обусловлена тем, что для водоемов площадью более 5 км^2 среднемесячные значения этого коэффициента в течение теплового периода года изменяются в подавляющем большинстве случаев от 0,1 до 0,4, то есть в среднем составляют 0,25. Исключением являются месяцы, когда температура воды в водоеме существенно выше температуры воздуха. Для более надежного обоснования принятого значения коэффициента трансформации рассчитаны месячные суммы испарения с водной поверхности при значениях коэффициента трансформации, равных 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4. Некоторые результаты этих расчетов приведены в табл. 3.9. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о

Таблица 3.9

Месячные суммы испарения при различных значениях коэффициента трансформации, мм

Год	Месяц	$M_{б.\,ср}$			
		0,1	0,2	0,3	0,4
		Бухтарминское водохранилище			
1968	IX	118	115	112	109
1969	VII	104	101	95	91
	VIII	115	112	107	66
1970	VI	70	68	66	61
	VII	76	74	70	69
	VIII	118	114	108	104
	IX	110	108	102	98
1972	VI	62	60	58	56
	VII	72	70	70	67
	VIII	106	102	98	90
	IX	109	106	102	98
		Краснооскольское водохранилище			
1967	VII	182	178	174	169
1973	VIII	126	123	119	115
1974	X	67	66	66	65
		Валдайское озеро			
1969	VI	102	98	94	90
	VII	95	92	90	86
	VIII	94	90	88	85
	IX	61	60	59	58

том, что максимальные погрешности расчета значений испарения в диапазоне значений $M_{б.\,ср} = 0{,}1...0{,}4$ составляют не более 15 % месячных сумм испарения. При $M_{б.\,ср} = 0{,}25$ эти погрешности сокращаются вдвое (равны 7—8 %), что вполне приемлемо, учитывая то обстоятельство, что существующие расчетные схемы по оценке месячных сумм испарения с водоемов имеют погрешности $\pm 25...30$ %.

При $M_{б.\,ср} = 0{,}25$ формула для определения коэффициента $K_{\Delta e}$ с учетом соотношения (3.29) примет вид

$$K_{\Delta e} = (0{,}8e_{0_п} - 0{,}75e_н)/(e_{0_н} - e_н). \qquad (3.32)$$

Величина $e_{0_п}$ в данной формуле представляет собой давление насыщенного водяного пара, определенное по средней температуре поверхности водоема. Последнюю можно определить по методу аналогии или расчетным путем по методике, изложенной в работах [29, 131, 150].

Пользуясь формулой (3.32) и номограммой (см. рис. 3.4), по данным наземного испарителя ГГИ-3000 определяют среднее для водоема значение испарения, приведенное к плавучему испарителю ГГИ-3000. Для получения реального значения испарения с водоема следует полученное значение умножить на инструментальный коэффициент испарителя ГГИ-3000, равный 0,8. Для проверки разработанной методики привлечены данные о месячных суммах испарения с плавучих испарителей ГГИ-3000 и плавучих испарительных бассейнов площадью 20 м² по всем пунктам водно-испарительной сети, действовавшим в период с начала наблюдения по 1975 г. включительно. Погрешности определения месячных сумм испарения не превысили ± 25 %. В табл. 3.10 приведены результаты расчетов среднемесячных значений испарения по изложенной методике для ряда водоемов СССР.

По разработанной методике рассчитаны многолетние годовые (за период открытой водной поверхности) и месячные значения испарения для 68 пунктов территории СССР (см. прил. I). На основании выполненных расчетов и с привлечением данных плавучих испарителей построены карты норм годового и месячного испарения с водной поверхности для всей территории СССР.

Одна из карт этой серии (рис. 3.5) использована при оценке годовых сумм испарения с поверхности ряда водохранилищ СССР (см. гл. 5).

Надо обратить внимание на то, что изложенная методика, использующая для определения $E_в$ формулу (3.32), основана на допущении, что для большинства водоемов значение $M_{б.\,ср} = 0{,}1...$ $...0{,}4$. Очевидно, что при известном значении средней длины разгона воздушного потока над реальным водоемом для него можно определить конкретное значение коэффициента трансформации $M_{б.\,ср}$ и соответственно уточнить расчетную зависимость (3.32) по определению $K_{\Delta e}$. В этом случае расчеты испарения с указанного конкретного водоема по изложенной методике будут более точны.

Таблица 3.10

Расчет испарения с ряда водоемов по данным испарителя ГГИ-3000

Год	Месяц	$e_н$	$e_{0_н}$	$e_{0_п}$	$K_{\Delta e}$	$E_н$	$E_в$	E_{20}
				Бухтарминское водохранилище				
1968	IX	6,1	13,6	16,4	1,14	97	115	119
1969	VII	17,9	31,7	28,3	0,67	148	97	116
	VIII	11,3	22,5	20,9	0,76	150	110	118
1970	VI	12,4	23,7	18,5	0,50	118	64	66
	VII	13,8	26,5	20,9	0,51	153	81	95
	VIII	13,0	22,4	22,4	0,95	132	119	101
	IX	9,3	18,0	18,7	0,95	102	106	86
1972	VI	14,0	25,2	19,4	0,46	118	69	82
	VII	14,5	23,8	20,4	0,60	97	65	72
	VIII	12,4	23,4	22,0	0,78	128	101	118
	IX	7,6	14,5	16,2	1,09	89	106	93
				Краснооскольское водохранилище				
1967	VII	14,4	28,8	30,8	1,00	210	165	180
	VIII	15,6	27,8	30,2	1,1	159	146	148
1970	VI	12,4	24,3	24,1	0,87	153	127	126
	VIII	14,2	24,9	26,5	1,02	146	135	130
1971	VI	13,1	25,2	23,8	0,79	177	132	118 *
	IX	13,2	20,9	22,4	1,07	110	117	93
1972	VIII	13,7	28,5	29,5	0,93	275	183	186
1973	V	12,5	20,3	18,9	0,75	117	96	91
	VIII	14,7	24,0	26,5	1,13	116	132	122 *
1974	VII	15,8	27,1	27,9	0,96	126	121	134
	VIII	14,0	25,2	27,4	1,06	165	149	166
	X	11,2	14,9	16,3	1,28	46	66	50
				Валдайское озеро				
1969	VI	10,3	18,7	18,8	0,90	92	95	101
	VII	14,0	21,3	21,3	0,92	84	95	91
	VIII	12,9	19,5	20,3	1,02	75	92	95
	IX	9,6	13,6	15,0	1,23	40	59	75

*Данные за 30 сут.

Примечание. E_{20} — измеренные значения испарения с плавучего испарительного бассейна площадью 20 м², $E_н$ — то же с испарителя ГГИ-3000.

Рекомендации по определению средней длины разгона воздушного потока над водоемом по упрощенной методике приведены в следующей главе. Там же изложены методы определения ряда гидрометеорологических элементов для водной поверхности с использованием данных наблюдений континентальных метеостанций. Такая задача часто возникает при расчете испарения с водоемов, особенно при расчетах испарения для проектируемых водохранилищ.

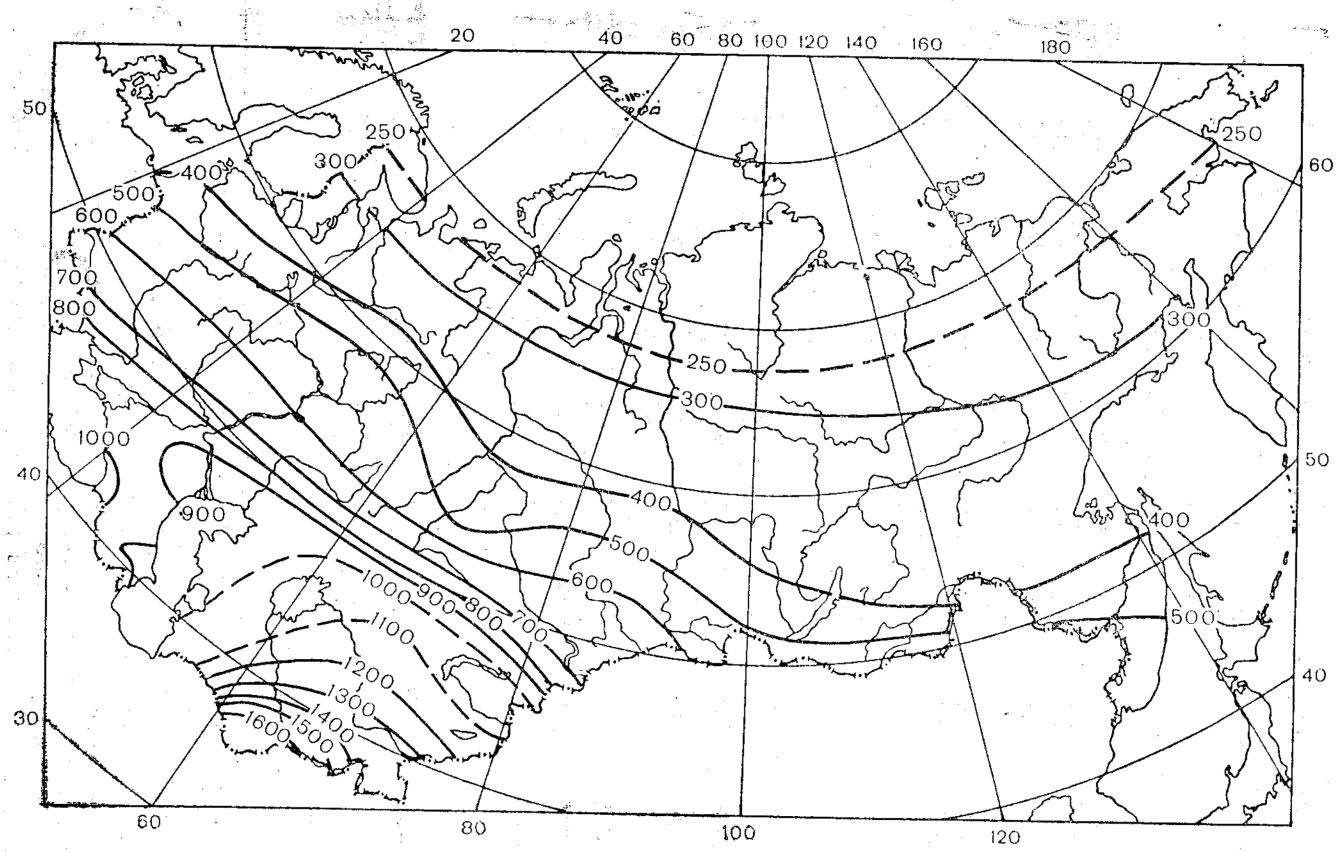


Рис. 3.5. Карта норм годового (за период открытой водной поверхности) испарения с водной поверхности плавучего испарительного бассейна площадью 20 м², мм.

3.5. Методика определения изменения запаса воды в водохранилище

В практике воднобалансовых расчетов элементы, характеризующие изменение запаса воды в водоеме, принято называть аккумуляционными составляющими уравнения водного баланса [52]. Данный термин не совсем удачен, так как под аккумуляцией всегда понимают накопление вещества, в данном случае воды. При сработке водоема применение этого термина становится неправомерным. Поэтому терминологически более правильно говорить об изменении запаса воды в водоеме за определенный период, которое может иметь как положительный, так и отрицательный знаки.

При воднобалансовых расчетах рассматривают несколько отдельных составляющих, характеризующих суммарное изменение запаса воды в водохранилищах за расчетный интервал времени: изменение объема воды в чаше, изменение объемов воды на участках притоков от гидрометрических створов до уреза водохранилища, потери воды при оседании льда на его берегах при зимнем снижении уровня и дополнительные объемы воды, поступающие в водохранилище при таянии льда на берегах в весенний период. Три последние составляющие имеют подчиненное значение (см. п. 8.1). Методы их определения известны. Для оценки изменения объемов воды на участках притоков от гидрометрических створов до уреза водохранилища, находящихся в подпоре, можно использовать методы гидрометрии, изложенные, например, в работах [117—119].

Однако без постановки специальных гидрометрических измерений в целях получения необходимой информации, аналогичной той, которая требуется для построения кривых подпора [131], сколько-нибудь надежно определить указанный элемент баланса невозможно. Методы определения двух других составляющих, связанных с оседанием льда на берегах и его последующим поступлением в водохранилище в весенние месяцы, также общеизвестны [52]. Для таких расчетов необходима дополнительная информация о глубине погружения льда в воду в зимний период.

Методика определения изменения запаса воды в котловине водохранилища основана на использовании зависимостей между уровнями и объемами воды в нем. Графическим выражением таких зависимостей являются кривые объемов водохранилищ, по которым определяют запас воды в них при любых отметках уровенной поверхности. При этом надежность расчетов зависит, с одной стороны, от правильности определения среднего уровня водохранилища, а с другой — от надежности построения кривой объемов.

Рекомендации по определению среднего уровня водоемов изложены в Руководстве по обработке и подготовке к печати материалов наблюдений на озерах и водохранилищах [132]. Применительно к водохранилищам, особенно речного типа, задача определения среднего уровня значительно усложняется в связи с наличием уклонов водной поверхности, особенно в зоне выклинивания подпора.

Наиболее существенные уклоны возникают в периоды пропуска через водохранилища стока весеннего половодья. Так, например, разница в отметках среднемесячных уровней в приплотинной части (г. Тольятти) и на конечном участке зоны выклинивания подпора Куйбышевского водохранилища (п. Сокольи Горы) протяженностью около 650 км в этот период в отдельные годы достигала 4 м и более. Для других крупных водохранилищ протяженностью 100—500 км эта разница составляет 2—3 м. Правда, такие большие перепады уровней характерны только для периода весеннего половодья. В другие сезоны года эти различия намного меньше и для крупных равнинных водохранилищ составляют 40—50 см. Тем не менее, указанное обстоятельство необходимо учитывать при определении объема воды в водохранилище.

В связи с существенными перепадами уровня крупных водохранилищ по длине объем воды в них часто определяют по кривым объемов, построенным для отдельных характерных частей водохранилища, в пределах которых колебания уровня воды не выходят за пределы 3—5 см. Приемы определения среднего уровня водохранилища (или его отдельных участков) изложены в ряде пособий [114, 132] и в настоящей работе не рассмотрены.

Автор выполнил анализ расчетных зависимостей, применяемых при построении кривых объемов. Результаты анализа позволяют рекомендовать для указанной цели следующие подходы. Для водохранилищ озерного типа объем первого придонного слоя воды рекомендуется определять по формуле усеченного параболоида:

$$W_{0-1} = (2/3) f_1 h_{\text{макс}_{0-1}}, \tag{3.33}$$

где f_1 — площадь водного зеркала, соответствующая первому от дна расчетному уровню воды; $h_{\text{макс}0-1}$ — максимальная глубина объема воды, заключенного ниже первого расчетного уровня.

Объемы воды, заключенные между последующими расчетными уровнями при незначительной разности соответствующих им площадей, определяют по формуле из работы [166]:

$$W_{i,\,i+1} = 0{,}5\,(f_i + f_{i+1})\,h_{i,\,i+1}, \tag{3.34}$$

где h — сечение горизонталей.

При соотношении площадей $f_{i+1}/f_i > 1{,}5$ их определяют по формуле объема усеченного конуса:

$$W_{i,\,i+1} = (1/3)\,(f_i + f_{i+1} + \sqrt{f_i f_{i+1}})\,h_{i,\,i+1}. \tag{3.35}$$

Для отдельных характерных участков водохранилищ речного типа расчеты рекомендуется выполнять по формуле (3.34) с последующим суммированием данных об объеме каждого слоя по всем участкам и расчетом кривой объемов последовательным суммированием этих слоев от днища долины до наивысшего уровенного горизонта.

В целом для водохранилища объемы отдельных слоев рекомендуется определять по сокращенной формуле Симпсона

$$W_{i,\,i+2} = (1/3)\,(f_i + 4f_{i+1} + f_{i+2})\,h_{i,\,i+2}, \qquad (3.36)$$

где $W_{i,\,i+2}$ — объем двух смежных слоев воды, заключенных между горизонталями, при которых площади водоема равны f_i и f_{i+2}.

При использовании данной формулы расчеты удобнее вести сначала для слоев, заключенных между четными горизонталями, а затем — между нечетными, чтобы получить все координаты кривой объемов.

Объем малых речных водохранилищ при отсутствии необходимых картографических материалов можно приближенно оценить по формуле из работы [66]:

$$W = (1/6)\,lh_{\text{макс}}\,(B + 2b^*), \qquad (3.37)$$

где l, B и $h_{\text{макс}}$ — соответственно длина, ширина и максимальная глубина водохранилища у плотины; b^* — средняя ширина речной поймы, затапливаемой водохранилищем.

Точность кривых объемов зависит от масштаба топографической карты, использованной при их построении, и высоты сечения рельефа. Ориентировочные погрешности при определении объемов средних и больших водохранилищ, согласно работе [119], следующие:

Полный объем водохранилища, км³ . .	0,5	1,0	5,0	10
Погрешность, %	1—2	2—3	3—4	4—5

В связи с изменением во времени морфометрических характеристик котловины водохранилища вследствие осаждения наносов и переработки берегов кривые объемов водохранилища, составленные на стадии проектирования, по мере эксплуатации водохранилища уточняют.

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При расчетах испарения с поверхности водоемов, особенно с использованием эмпирических формул, возникает необходимость в определении отдельных гидрометеорологических элементов для условий водной поверхности. Данных непосредственных наблюдений за гидрометеорологическими элементами над водоемами весьма мало. Они, как правило, имеются лишь для крупнейших озер и водохранилищ, и то в основном для береговой зоны. Поэтому при массовых расчетах испарения с озер и водохранилищ СССР используют значения гидрометеорологических элементов,

определенных на континентальных метеостанциях с последующей их приводкой к условиям водоема. Этот же прием используют при расчетах испарения с проектируемых водохранилищ, для которых вопрос о получении данных прямых измерений над водной поверхностью вообще теряет смысл. В настоящее время предложены различные способы пересчета данных континентальных метеостанций на водоем. Применительно к задаче расчета испарения рассмотрены способы определения скорости ветра и температуры воды водоема по данным континентальных метеостанций, а также методика определения среднего значения коэффициента трансформации воздушной массы над водоемом.

4.1. Предлагаемая методика определения скорости ветра над водоемом

Вопросами трансформации скорости ветра над водоемами занимались многие исследователи. В теоретическом плане эти вопросы рассмотрены в трудах Л. С. Гандина [62], А. А. Дмитриева и И. Н. Соколова [77], М. П. Тимофеева [144, 148], А. С. Зайцева [85, 86] и др. Однако решения, полученные этими авторами, в большинстве своем приближенные, а конечные формулы непригодны для практических расчетов. Экспериментальные работы в данной области были выполнены С. А. Сапожниковой [134], З. А. Викулиной [33], Г. Г. Тараканом [141], В. Н. Тервинским [142, 143] и А. Р. Константиновым [97].

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что изменение скорости ветра на некоторой (небольшой) высоте при его переходе с суши на водоем обусловлено рядом причин:

1) изменением шероховатости подстилающей поверхности;

2) изменением характера турбулентного обмена на границе двух сред;

3) изменением локального барического градиента, вызываемого горизонтальным градиентом температуры воздуха над сушей и водоемом.

Все факторы, определяющие изменение скорости ветра, могут действовать как в отдельности, так и одновременно. В частности, при равновесных условиях состояния атмосферы над водоемом и сушей изменение скорости ветра определяется, главным образом, изменением параметра шероховатости, так как отсутствует локальный барический градиент, а турбулентный обмен над водной поверхностью существенно ослаблен. Большинство расчетных методов, предложенных для оценки скорости ветра над водоемом по данным континентальных метеостанций, так или иначе учитывают указанные особенности трансформации воздушной массы при переходе с суши на водоем.

Наиболее широко в настоящее время применяют методы перехода от показаний континентальных метеостанций к условиям водоема через поправочный коэффициент K, представляющий собой

отношение скорости ветра над водоемом $\omega_в$ к скорости ветра, измеренной на континентальной метеостанции $\omega_с$:

$$K = \omega_в/\omega_с. \tag{4.1}$$

Для определения этого коэффициента предложено несколько приемов. Одним из наиболее распространенных и рекомендованных в Указаниях по расчету испарения с поверхности водоемов [150] является способ определения общего коэффициента K как произведения трех отдельных коэффициентов, определяемых в зависимости от степени защищенности метеорологической станции (K_1), рельефа местности, окружающей ее (K_2), и средней длины разгона воздушного потока над водоемом (K_3). Наибольший вклад в разработку такой методики внесли А. П. Браславский и З. А. Викулина [33].

Расчетная формула для определения скорости ветра над водоемом на высоте 200 см в этом случае имеет следующий вид:

$$\omega_в = K_1K_2K_2\omega_{фл}, \tag{4.2}$$

где $\omega_{фл}$ — скорость ветра на высоте флюгера за расчетный интервал времени.

Для водоемов с площадью водного зеркала $f > 5$ км^2 значения коэффициента $K_3 = 1$.

Использование этой схемы для практических расчетов встречает ряд существенных затруднений, основными из которых являются:

1) значительная субъективность и неопределенность при нахождении по таблицам коэффициентов K_1 и K_2. Это связано, с одной стороны, с большим разнообразием условий рельефа и защищенности метеостанций, которые трудно классифицировать, а с другой — с краткостью и, зачастую, неопределенностью описаний станций, публикуемых в режимных материалах наблюдений;

2) громоздкость и трудоемкость определения K_3 для водоемов с площадью $f < 5$ км^2. Для этого необходимо иметь карту водоема (вопрос о ее масштабе остается открытым), а также данные о повторяемости направлений ветра по различным румбам. Таких наблюдений на водноиспарительной сети не ведут. Их вообще осуществляют в ограниченном объеме, и получение таких данных зачастую весьма затруднительно.

Следует также отметить, что эта расчетная схема основана на предположении, что для каждой береговой станции обобщенный коэффициент K является постоянным. На самом деле это не так. Исследования, выполненные различными авторами, показали изменчивость этого коэффициента во времени. Так, В. Н. Тервинский, проводивший исследования на Цимлянском водохранилище, установил, что наибольшие значения K отмечают при небольших скоростях ветра. С увеличением скорости ветра значение этого коэффициента уменьшается [143].

Использование изложенной методики для расчета декадных и месячных значений скорости ветра над водой поверхностью

Таблица 4.1

Сопоставление измеренных скоростей ветра над водной поверхностью ($\omega_{в_и}$) с рассчитанными по Указаниям [150] ($\omega_{в_р}$)

Год	Месяц	Декада	$\omega_{в_р}$ м/с	$\omega_{в_и}$ м/с	$\frac{\omega_{в_р}}{\omega_{в_и}} 100$ %
		Тедженское водохранилище			
1968	IV	I	3,1	2,5	124
		II	3,5	2,9	121
		III	5,0	4,7	106
		Среднее	3,7	3,4	109
	VII	I	4,2	4,0	105
		II	4,2	3,5	120
		III	4,4	4,2	105
		Среднее	4,4	3,9	113
	VIII	I	4,3	3,3	130
		II	4,2	3,8	110
		III	2,2	2,1	105
		Среднее	3,6	3,0	120
	X	I	2,6	2,6	100
		II	3,0	2,7	111
		III	2,2	2,0	110
		Среднее	2,6	2,4	108
		оз. Часкак			
1961	IV	I	4,0	2,7	148
		II	4,2	2,7	156
		III	3,7	2,7	137
		Среднее	4,0	2,7	148
	V	I	3,8	2,9	131
		II	5,0	3,6	139
		III	3,1	1,9	163
		Среднее	4,0	2,8	143
	VIII	I	3,7	2,9	128
		II	4,2	3,2	131
		III	4,4	3,6	122
		Среднее	4,2	3,3	127
	IX	I	4,2	3,5	120
		II	2,8	2,3	122
		III	2,6	2,2	118
		Среднее	3,2	2,7	118
	XI	I	1,3	1,1	118
		II	5,6	3,9	114
		III	6,9	4,7	147
		Среднее	4,6	3,2	144
		Сары-Язинское водохранилище			
1966	IV	I	1,7	2,7	63
		II	2,0	3,4	59
		III	2,4	2,9	83
		Среднее	2,1	3,0	70
	V	I	3,0	4,1	73
		II	2,5	3,1	81
		III	2,5	2,7	92
		Среднее	2,6	3,3	79

Год	Месяц	Декада	$\omega_{в_р}$ м/с	$\omega_{в_и}$ м/с	$\frac{\omega_{в_р}}{\omega_{в_и}} 100$ %
1966	VII	I	2,6	3,5	74
		II	2,8	3,6	78
		III	3,2	4,0	80
		Среднее	2,7	3,7	73
	X	I	2,4	2,9	83
		II	1,9	2,4	79
		III	1,6	2,3	69
		Среднее	2,0	2,4	83
		оз. Нарочь			
1971	V	I	1,8	1,9	95
		II	2,3	2,4	96
		III	3,8	3,8	100
		Среднее	2,6	2,7	96
	VII	I	4,2	4,8	88
		II	2,4	3,6	67
		III	1,8	2,0	90
		Среднее	2,8	3,5	80
	X	I	3,2	4,0	80
		II	3,2	4,6	70
		III	3,3	3,9	85
		Среднее	3,2	4,2	76
		оз. Сартай			
1965	V	I	4,0	2,8	143
		II	4,0	3,5	114
		III	4,0	3,1	129
		Среднее	4,0	3,1	128
	VII	I	5,4	4,1	132
		II	2,7	2,6	104
		III	4,0	3,5	114
		Среднее	4,0	3,4	118
	VIII	I	4,0	3,2	125
		II	2,7	2,1	128
		III	5,4	3,4	159
		Среднее	4,0	2,9	138
	X	I	2,7	2,8	96
		II	4,0	3,1	129
		III	5,4	3,8	142
		Среднее	4,0	3,2	125

различных водоемов СССР показало, что погрешности могут достигать ± 40 % и более (табл. 4.1). Вместе с тем, данная методика является единственной, рекомендованной действующими Указаниями [150]. Кроме этой методики были предложены и другие расчетные схемы, в частности, в работах В. А. Тервинского [142], А. С. Зайцева и М. П. Тимофеева [86, 87, 145] и В. С. Вуглинского [58]. Первый из этих авторов предложил использовать для расчета коэффициента K за сутки номограмму, в которой значение K

определяют в зависимости от скорости ветра по прибрежной метеостанции и разности температуры вода — воздух, характеризующей термическую стратификацию воздуха над водоемом. Для построения номограммы Тервинский использовал материалы 523 наблюдений на Цимлянском водохранилище. Среднеквадратические отклонения расчетных значений $\omega_в$ для малых скоростей ветра (1—4 м/с) составили около 0,3—0,4, а для больших (9—12 м/с) около 0,12—0,15, что, по мнению Тервинского, свидетельствует о достаточной надежности номограммы. Он рекомендовал ее использовать для всех водохранилищ степной зоны СССР. Данная номограмма проверена по материалам наблюдений за скоростью ветра на Краснооскольском водохранилище. Погрешности месячных значений скорости ветра достигали $\pm(1{,}5...2)$ м/с и более.

Зайцев и Тимофеев для расчета коэффициента K за декаду и месяц также предложили номограмму, в которой данный коэффициент представлен в зависимости от длины разгона воздушного потока над водоемом и параметра $\Delta T/\omega_с^2$, где $\Delta T = T_0 - T_1$ — разность температуры поверхности воды и воздуха на суше на высоте 1 м. В данной номограмме коэффициент K характеризует соотношение скоростей ветра над сушей и водоемом на высоте 1 м.

К скорости ветра на других высотах рекомендуется переходить по известной логарифмической формуле

$$\omega = \omega_1 \ln (h/z_0)/\ln (h_1/z_0), \qquad (4.3)$$

где ω и ω_1 — скорость ветра на высоте h и h_1 соответственно, z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Зайцев и Тимофеев рекомендовали использовать при расчетах скорости ветра для водной поверхности $z_{0_в} = 10^{-4}$ м, а для суши $z_{0_с} = 10^{-2}$ м. Проверка данной расчетной схемы, выполненная Зайцевым и Тимофеевым по материалам наблюдений на ряде водохранилищ, показала ее достаточную надежность. Отклонения рассчитанных значений скорости ветра от измеренных на высоте 1 м над водной поверхностью не превышали ± 1 м/с.

Вместе с тем, следует отметить, что недостатками указанной методики являются трудоемкость определения длины разгона (см. п. 4.2) и необходимость надежного определения температуры воды водоема, что не всегда возможно, особенно при расчетах скорости ветра для проектируемых водохранилищ.

Автор в 1979 г. для расчета коэффициента K также предложил номограмму, которая вошла в нормативный документ [131]. Номограмма построена на основании следующих теоретических предпосылок. В связи с тем, что при равновесных условиях состояния атмосферы изменение скорости ветра с высотой можно выразить логарифмической формулой (4.3), можно записать две зависимости, характеризующие изменение скорости ветра с высотой над водоемом и сушей, причем в качестве верхнего расчетного уровня принимают высоту пограничного слоя атмосферы 200 м, а в каче-

стве нижнего — высоту 2 м:

$$\omega_{200_в} = \omega_{2_в} \ln (h_{200_в}/z_{0_в})/\ln (h_{2_в}/z_{0_в}), \quad (4.4)$$

$$\omega_{200_с} = \omega_{2_с} \ln (h_{200_с}/z_{0_с})/\ln (h_{2_с}/z_{0_с}). \quad (4.5)$$

Примем во внимание то, что на высоте пограничного слоя атмосферы скорость ветра при переходе с суши на водоем не меняется, то есть $\omega_{200_в} = \omega_{200_с}$. Решая совместно уравнения (4.4) и (4.5), с учетом отмеченного обстоятельства приходим к следующему выражению:

$$K = \frac{\omega_в}{\omega_с} = \frac{\ln (h_{200_с}/z_{0_с}) \ln (h_{2_в}/z_{0_в})}{\ln (h_{2_с}/z_{0_с}) \ln (h_{200_в}/z_{0_в})}. \quad (4.6)$$

В формулах (4.4)—(4.6) числа 2 и 200 у параметров характеризуют высоту расчетных уровней, а буквы «в» и «с» показывают, для какой поверхности (суши или водоема) ведут расчет. После подстановки в формулу (4.6) числовых значений и после некоторых преобразований приходят к следующему выражению:

$$K = \frac{(0{,}6931 - \ln z_{0_в})}{(5{,}2983 - \ln z_{0_в})} \frac{(5{,}2983 - \ln z_{0_с})}{(0{,}6931 - \ln z_{0_с})}. \quad (4.7)$$

Значения первого и второго сомножителей правой части формулы (4.7) зависят от значений параметра шероховатости водной поверхности и суши соответственно. Так как шероховатость водной поверхности всегда меньше шероховатости суши, будет справедливо неравенство $\ln z_{0_в} < \ln z_{0_с}$. Как известно, шероховатость поверхности суши оценивают несколькими сантиметрами, а водной поверхности — на порядок меньше [97, 147]. Поэтому логарифмы этих величин в формуле (4.7), где $z_{0_в}$ и $z_{0_с}$ выражены в метрах, будут иметь отрицательные значения. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что первый сомножитель в формуле (4.7) будет всегда меньше, а второй — больше 1. Следовательно, коэффициент K в большей степени зависит от значения шероховатости поверхности суши, чем от значения шероховатости водной поверхности. На рис. 4.1 линия *1* соответствует предельному положению кривой зависимости коэффициента K от $\ln z_{0_с}$ при $z_{0_в} \to 0$, при $z_{0_с} = z_{0_в}$ коэффициент $K = 1$ и постоянен. Таким образом, кривые зависимости коэффициента K от $\ln z_{0_с}$ при различных соотношениях $z_{0_с}/z_{0_в}$ будут располагаться в указанном интервале. Для того чтобы определить положение этих кривых, соответствующее реальным условиям, проанализированы все имеющиеся данные параллельных наблюдений за скоростями ветра по континентальным и плавучим установкам, полученные на водно-испарительной сети СССР по 1975 г. включительно. Выполненный анализ позволил рекомендовать в качестве расчетных кривые *2* и *3*, (см. рис. 4.1) [58]. Кривую *2* рекомендуем для расчета коэффициента применительно к водоемам лесной, а кривую *3* — степной и полупустынной зон.

Для расчета $\ln z_{0c}$ используем зависимость, вытекающую из формулы (4.3):

$$\ln z_{0_c} = (\omega_{фл} \ln 2 - \omega_{2_c} \ln h_{фл})/(\omega_{фл} - \omega_{2_c}), \qquad (4.8)$$

где $\omega_{фл}$ — скорость ветра на высоте флюгера $h_{фл}$.

Проверка расчетных зависимостей показала, что в 96 % случаев рассчитанные значения отличались от измеренных не более чем на $\pm 0{,}5$ м/с. И только в 4 % случаев погрешности расчета лежали в пределах $\pm (0{,}6...1{,}0)$ м/с. Все эти случаи относятся к месяцам переходных сезонов — весны и осени. Среднеквадратическое отклонение рассчитанных скоростей ветра составило 0,25 м/с. Результаты расчетов скорости ветра по предложенной методике для трех крупных водохранилищ СССР приведены в табл. 4.2.

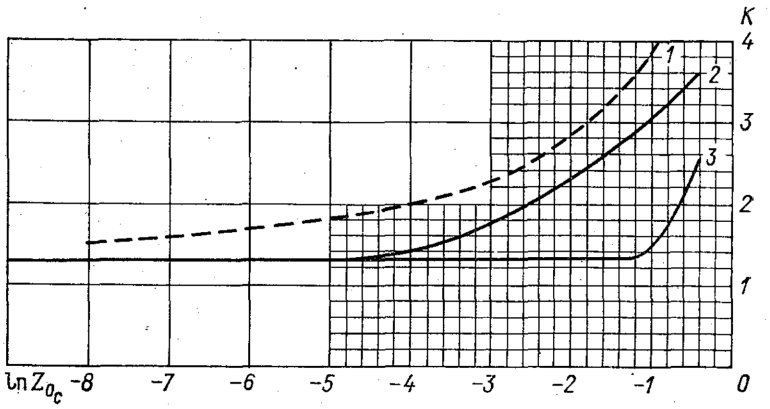


Рис. 4.1. Номограмма для определения коэффициента K.

Как показал выполненный анализ, указанные погрешности определения скорости ветра над водоемом по предложенной методике не могут существенно влиять на точность расчета месячного слоя испарения с водоемов по формулам, в которые в качестве аргумента входит величина $\omega_в$. Таким образом, для расчета скорости ветра над водоемом по предложенной методике необходимо располагать сведениями о скоростях ветра на береговой станции на двух уровнях. При их наличии по формуле (4.8) находят значение $\ln z_{0_c}$ и затем по графикам (см. рис. 4.1) снимают значение коэффициента K. Учитывая, что на метеорологической сети СССР скорость ветра измеряют на высоте флюгера и на высоте 2 м над земной поверхностью, определение значения $\ln z_{0_c}$ по формуле (4.8) не вызывает затруднений. В то же время, при использовании данной методики отпадает необходимость учитывать степень защищенности метеостанции, характер рельефа, а также определять среднюю длину разгона воздушного потока над водоемом. При желании зависимость $\ln z_{0_c}$ от K можно представить в табличной форме.

Таблица 4.2

Скорость ветра над водной поверхностью $\omega_{2_{в_р}}$, определенная по предложенной методике, м/с

Год	Месяц	$\omega_{фл}$	ω_{2_c}	$\ln z_{0_c}$	K	$\omega_{2_{в_р}}$	$\omega_{2_{в_и}}$	$\omega_{2_{в_р}} - \omega_{2_{в_и}}$
			Каттакурганское водохранилище					
1956	V	2,8	1,3	—0,41	2,45	3,2	2,9	0,3
	VII	3,5	1,4	—0,22	2,80	3,9	4,3	—0,4
	VIII	2,2	1,1	—0,37	2,50	2,8	3,0	—0,2
	X	1,7	0,9	—0,44	2,40	2,2	2,2	0
	XI	1,2	0,8	—0,68	1,85	1,5	1,6	—0,1
1957	VI	2,2	1,1	—0,36	2,55	2,8	3,1	—0,2
	VII	2,4	1,3	—0,47	2,30	3,0	3,1	0,2
	IX	1,8	0,8	—0,30	2,65	2,1	2,2	—0,1
	X	2,4	0,9	—0,22	2,80	2,5	2,2	0,3
1959	VII	2,3	1,3	—0,56	2,15	2,8	2,7	0,1
	VIII	2,2	1,0	—0,35	2,55	2,6	2,5	0,1
	IX	2,1	1,0	—0,39	2,45	2,4	2,4	0
	X	1,7	0,9	—0,47	2,30	2,1	2,1	0
1961	IV	2,0	1,1	—0,52	2,25	2,5	2,4	0,1
	V	2,4	0,9	—0,18	2,90	2,6	2,8	—0,2
	VI	2,2	0,8	—0,16	2,90	2,3	2,4	—0,1
	VII	4,5	2,7	—0,93	1,40	3,8	3,6	0,2
	VIII	4,9	3,0	—1,19	1,25	3,8	3,2	0,6
	IX	4,4	2,8	—1,26	1,20	3,4	2,9	—0,5
	X	3,1	2,0	—1,26	1,20	2,4	2,1	—0,3
			Краснооскольское водохранилище					
1967	VII	2,4	1,6	2,6	1,95	3,1	2,8	0,3
	VIII	1,9	1,3	2,8	1,90	2,5	2,4	0,1
1969	VI	2,6	1,8	3,0	1,85	3,3	2,8	0,5
	XI	3,0	2,5	7,6	1,40	3,5	3,3	0,2
1970	VI	2,0	1,4	3,2	1,75	2,4	2,7	—0,3
	VIII	2,2	1,6	3,8	1,65	2,6	2,9	—0,3
1971	IX	1,9	1,3	2,8	1,50	2,0	2,6	—0,6
1972	VIII	2,5	1,9	4,7	1,50	2,8	3,5	—0,7
	X	2,3	1,6	3,1	1,80	2,9	3,0	—0,1
1973	V	2,4	1,6	2,6	1,95	3,1	3,1	—
	VI	2,0	1,4	3,2	1,75	2,4	3,1	—0,7
1974	VII	1,7	0,9	1,1	2,90	2,6	2,0	—
	X	1,8	1,2	2,7	1,95	2,3	2,5	—0,2
			Бухтарминское водохранилище					
1968	IX	2,4	1,8	4,0	1,20	2,2	2,3	—0,2
1970	VIII	2,2	2,0	15,5	1,20	2,4	2,4	—
	IX	1,7	1,6	25,0	1,20	1,9	2,1	—0,3
	X	2,6	1,7	2,3	1,20	2,0	2,2	—0,2
1972	VI	1,5	1,7	14,5	1,20	2,0	1,9	0,1
	VII	1,6	1,4	10,5	1,20	1,4	1,9	—0,2
	IX	2,2	2,1	33,0	1,20	2,5	2,6	—0,1

Примечание. $\omega_{2_{в_и}}$ — измеренная скорость ветра над водоемом.

Изложенная методика определения скорости ветра над водоемом разработана для условий равновесной стратификации атмосферы. Возникла необходимость проверки применимости данной методики для месяцев, которые характеризуются неустойчивым состоянием атмосферы. В качестве критерия устойчивости атмосферы принят аналог числа Ричардсона $Ri \approx \Delta T/\omega_{2_в}^2$, где $\Delta T = t_0 - t'$ — разница температуры воды (t_0) и воздуха (t'); $\omega_{2_в}$ — скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью. Значения числа Ri опре-

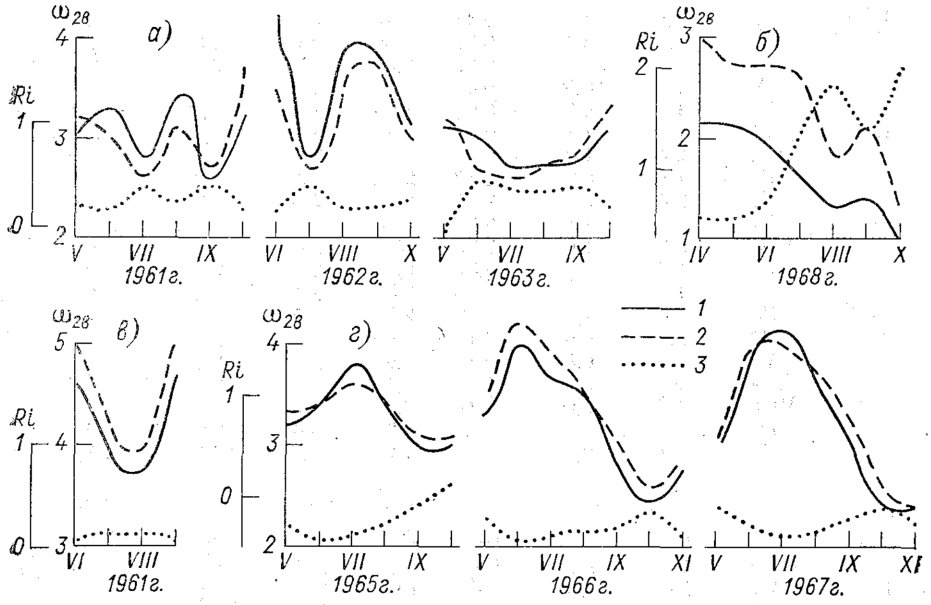


Рис. 4.2. Изменение среднемесячных значений скорости ветра над водной поверхностью ω_2 и числа Ri.

1 и *2* — измеренная и рассчитанная скорость ветра соответственно; *3* — число Ri; *а* — оз. Сартай, *б* — водохранилище на р. Куболта, *в* — оз. Чаны, *г* — Сарыязинское водохранилище.

делены по данным фактических наблюдений над водоемами с использованием данных плавучих испарительных установок. В связи с тем, что методика расчета скорости ветра разработана для упрощения расчетов испарения с водной поверхности по эмпирическим формулам, здесь рассмотрены лишь среднемесячные значения скорости ветра за теплый период года.

Совместный анализ характера изменения по месяцам значений параметра Ri и скоростей ветра над водной поверхностью показал, что между данными элементами существует тесная взаимосвязь. На рис. 4.2 приведен ход этих элементов для ряда станций, расположенных в различных природных условиях. Ход кривых изменения скорости ветра над водоемом повторяет ход кривых числа Ri. При этом при возрастании числа Ri уменьшается скорость ветра над водоемом. И наоборот, в те месяцы, когда значения числа Ri

уменьшаются, скорость ветра над водоемом возрастает. При этом чем больше амплитуда колебаний числа Ri по месяцам, тем больше амплитуда колебаний по месяцам скорости ветра над водоемом.

Анализ совместного хода кривых Ri и измеренных значений скорости ветра над водоемом за теплые периоды года, построенных для 15 станций, расположенных в различных районах СССР, показал, что ход измеренных значений скорости ветра над водоемом определенным образом связан с состоянием термической стратификации атмосферы. При этом значения числа Ri для разных месяцев изменялись в основном от —0,4 до 0,4. Рассмотрен вопрос о том, как согласуется ход рассчитанных по предложенной методике значений скорости ветра над водоемом с ходом числа Ri. С этой целью на графики нанесены кривые хода рассчитанных значений скорости ветра над водоемом. Анализ данных кривых показал, что они почти полностью повторяют ход кривых измеренных скоростей ветра и в свою очередь соответствуют ходу числа Ri. Во многих случаях кривые измеренных и рассчитанных значений скорости ветра почти совпадают. Однако в связи с тем, что результаты расчетов по предложенной методике не лишены погрешностей, кривая хода рассчитанных значений Ri может незначительно отклоняться либо вверх, либо вниз от кривой хода измеренных значений Ri.

Таким образом, методика, предложенная для расчета среднемесячной скорости ветра над водоемом, основанная на использовании логарифмического закона изменения ветра с высотой, позволяет достаточно точно рассчитывать этот элемент гидрометеорологического режима водоема. И для случаев инверсий ($Ri > 0$), и для сверхравновесных условий ($Ri < 0$) точность расчетов не снижается. Все изложенное говорит о том, что профиль ветра на высоте 2 м над водной поверхностью хотя и зависит от состояния термической стратификации атмосферы, достаточно хорошо описывается по логарифмическому закону. Этот вывод подтверждают результаты исследований других авторов. В частности, А. Р. Константинов в работе [97] приводит график зависимости коэффициента γ, характеризующего отклонения истинных профилей ветра над водной поверхностью от логарифмических в приземном слое, от устойчивости стратификации атмосферы, выражаемой числом Ri. При построении данного графика использованы значения скорости ветра на высоте 1 м над водной поверхностью. Ход кривой коэффициента γ для условий поверхности воды показал, что значения γ в диапазоне значений $Ri = -0{,}2...0{,}1$ изменяются очень незначительно, достигая при крайних значениях числа Ri значений 0,95 и 1,03. В большинстве случаев определенные значения числа Ri не выходили за пределы интервала —0,4...0,4. Лишь в одном случае месячное значение числа Ri намного превысило указанные его значения и составило $Ri = 1{,}5$ (см. рис. 4.2). В этом случае ход кривых измеренных и рассчитанных значений скорости ветра над водной поверхностью и ход числа Ri также остался согласованным, хотя кривая рассчитанных значений скорости ветра расположилась уже на довольно большом расстоянии от кривой измеренных

значений и погрешности определения среднемесячных значений $\omega_{2в}$ по предложенной методике составили в среднем 0,8 м/с или, другими словами, рассчитанные данные отличались от измеренных более чем на 30 %. Хотя по данному единичному случаю трудно сделать сколько-нибудь обоснованные выводы, можно предположить, что при достаточно больших отрицательных значениях числа Ri погрешности определения $\omega_{2в}$ по предложенной методике могут возрастать, и в этих случаях расчетная методика, по-видимому, нуждается в корректировке.

4.2. Предлагаемая методика определения среднего значения коэффициента трансформации воздушной массы над водоемом

При массовых расчетах испарения с водоемов с использованием стандартной гидрометеорологической информации возникает необходимость в определении влажности воздуха над водной поверхностью по данным континентальных метеостанций, так как материалы натурных наблюдений за влажностью воздуха над водоемами малочисленны и не характеризуют среднюю влажность для всего водоема. Такая же задача возникает при расчетах испарения с проектируемых водохранилищ, поскольку в этом случае определение гидрометеорологических элементов для водной поверхности возможно только косвенным путем. Вопросам оценки изменений влажности воздуха и температуры воздуха, так как процессы перемещения влаги и тепла в турбулентном воздушном потоке подобны, под влиянием водоемов посвящено много работ [133, 144—146]. Детальный анализ результатов таких исследований, выполненных в 50—60-х годах, дан в работах А. П. Браславского [28, 29, 30], который на основании теоретического рассмотрения данного вопроса с привлечением большого числа экспериментальных материалов предложил использовать для расчета абсолютной влажности воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью следующую формулу [33]:

$$e_{2_x} = e'_2 + (0{,}8e_0 - e'_2) M_б, \tag{4.9}$$

где e_{2_x} — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м над водоемом на расстоянии x км от берега (считая против направления ветра); e_2 — абсолютная влажность воздуха на той же высоте при переходе воздушного потока с суши на водоем, определяемая по данным континентальных метеостанций; e_0 — максимальное парциальное давление водяного пара, определяемое по температуре поверхности воды в водоеме; $M_б$ — коэффициент трансформации, учитывающий изменение влажности воздуха на профиле от берега до расчетной точки водоема.

Браславский постоянно совершенствовал расчетные формулы для определения коэффициента $M_б$. Наиболее надежной считается зависимость, предложенная им совместно с Л. П. Остроумовой в работе [35].

Для вычисления средней влажности воздуха для всего водоема Браславский предложил использовать осредненный коэффициент трансформации $\bar{M}_{б.\,ср}$, который надо определять в зависимости от средней длины разгона воздушного потока над водоемом и от разности между температурой воды в водоеме и температурой воздуха на континентальной метеостанции.

В соответствии с Указаниями [150] для расчета средней длины разгона ($L_{ср}$) воздушного потока над водоемом на план водоема следует нанести две системы прямоугольных профилей, ориентированные в первом случае с С на Ю и с З на В, а во втором случае — с СЗ на ЮВ и с СВ на ЮЗ. Среднюю длину разгона рекомендовано вычислять как среднее арифметическое из длин всех профилей данного направления. Для всей акватории водоема в таком случае среднюю длину разгона можно найти по зависимости

$$L_{ср} = (1/100)\,[L_{С+Ю}\,(N_С + N_Ю) + L_{З+В}\,(N_З + N_В) + \\ + L_{СЗ+ЮВ}\,(N_{СЗ} + N_{ЮВ}) + L_{СВ+ЮЗ}\,(N_{СВ} + N_{ЮЗ})], \qquad (4.10)$$

где $L_{С-Ю}$, $L_{З-В}$ и т. д. — средняя длина разгона воздушного потока по соответствующим направлениям профилей, км; $(N_С + N_Ю)$, $(N_З + N_В)$ и т. д. — сумма повторяемостей направлений ветра для двух взаимно противоположных румбов, %.

По найденному значению $L_{ср}$ и по таблице из Указаний [150] можно определить значение $\bar{M}_{б.\,ср}$ для определенных соотношений температуры воды и воздуха. Как справедливо отмечает Браславский, из-за криволинейного характера зависимости $\bar{M}_{б.\,ср} = f(L)$ некорректно определять коэффициент $\bar{M}_{б.\,ср}$ по осредненным длинам профилей [37]. Необходимо определить коэффициенты $M_{б.\,ср\,пр}$ для каждого профиля и затем их осреднить. Кроме того, среднее значение $M_{б.\,ср_{пр}}$ для данного направления ветра следует находить не как среднее арифметическое, а как средневзвешенное по длине профилей по формуле

$$M_{б.\,ср_{пр}} = \frac{(M_{б.\,ср_1} L_1 + M_{б.\,ср_2} L_2 + \ldots + M_{б.\,ср_п} L_n)}{\sum L}, \qquad (4.11)$$

где $L_1, L_2, \ldots, L_n$ — длины отдельных профилей.

Данную уточненную методику использовал Браславский при расчете значений $\bar{M}_{б.\,ср}$ для оз. Балхаш.

Надо отметить, что процедура определения коэффициента трансформации $\bar{M}_{б.\,ср}$ весьма трудоемка и требует большой рутинной работы, так как предполагает построение плана водоема, разбиение его системой прямоугольных сеток, подсчет длин отдельных профилей, определение коэффициентов $M_{б.\,ср_{пр}}$ для каждого профиля, определение средневзвешенных коэффициентов $\bar{M}_{б.\,ср}$ по отдельным направлениям ветра и затем в целом для всего водоема. В Указаниях [150] отмечено, что для водоемов с отношением

длины к ширине менее чем 2 : 1 при определении $\bar{L}_{ср}$ можно строить только одну сетку профилей, что хотя и несколько облегчает работу, но все же оставляет ее достаточно трудоемкой.

Выполнено специальное исследование, результаты которого позволяют существенно уменьшить трудоемкость определения коэффициента $\bar{M}_{б.\,ср}$ без снижения точности расчетов. Все многообразие форм водоемов сводят к двум — округлой и прямоугольной. Надо отметить, что большинство как естественных, так и искусственных водоемов характеризуются такими или близкими к ним очертаниями. Что касается водохранилищ речного типа, то практически всех их можно схематизировать в виде прямоугольника.

Особенности расчета $\bar{M}_{б.\,ср}$ для водоемов округлой формы. Очевидно, что для них не надо строить системы параллельных профилей по всем восьми румбам направлений ветра — все они будут идентичными при постоянном расстоянии между профилями. Таким образом, задачу сводят к построению одной системы профилей, определению для каждого профиля значения $M_{б.\,ср_{пр}}$ и вычислению средневзвешенного значения $\bar{M}_{б.\,ср}$ по данному направлению, которое и будет характеризовать коэффициент $\bar{M}_{б.\,ср}$ для всего водоема в целом. Однако и эту процедуру можно упростить. В соответствии с существующими представлениями, при разбиении круга системой параллельных линий, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, значение частного $\sum L/n = \pi D/4 = 0{,}78D$, где $\sum L$ — сумма длин всех отрезков, n — их число, D — диаметр круга.

Таким образом, при вычислении $\bar{M}_{б.\,ср}$ для отдельного направления на основании значения длины разгона, полученного как среднеарифметическое из длин отдельных профилей, достаточно было бы принять его соответствующим $L = 0{,}78D$. Однако при расчетах $\bar{M}_{б.\,ср}$ следует определять его средневзвешенное значение с учетом длины отдельных профилей. Этот прием определения

Таблица 4.3

Пример расчета среднего значения коэффициента трансформации $\bar{M}_{б.\,ср}$ для Больше-Топольненского водохранилища округлой формы

Площадь водохранилища, км²	Диаметр[1], км	Расчет по существующей методике									Расчет по предлагаемой методике	
		среднее значение коэффициента $M_{б.\,ср}$ по отдельным направлениям				повторяемость ветра различных направлений, %				средневзвешенное значение $\bar{M}_{б.\,ср}$	среднее значение длины разгона, м $L=0{,}78\,D$	$\bar{M}_{б.\,ср}$
		С—Ю	З—В	СЗ—ЮВ	СВ—ЮЗ	С—Ю	З—В	СЗ—ЮВ	СВ—ЮЗ			
124	13	0,30	0,26	0,28	0,27	24	23	17	36	0,28	10	0,28

[1] Диаметр круга, площадь которого соответствует площади водохранилища.

$\bar{M}_{б.\,ср}$ хотя и отличается от указанного ранее, но для водоема круглой формы дает практически те же результаты. Это положение подтверждено путем расчетов по моделям ряда водоемов, имеющих очертания в виде окружностей, с заданием произвольного горизонтального масштаба (прил. 2 и 3). Расчеты подтвердили воз-

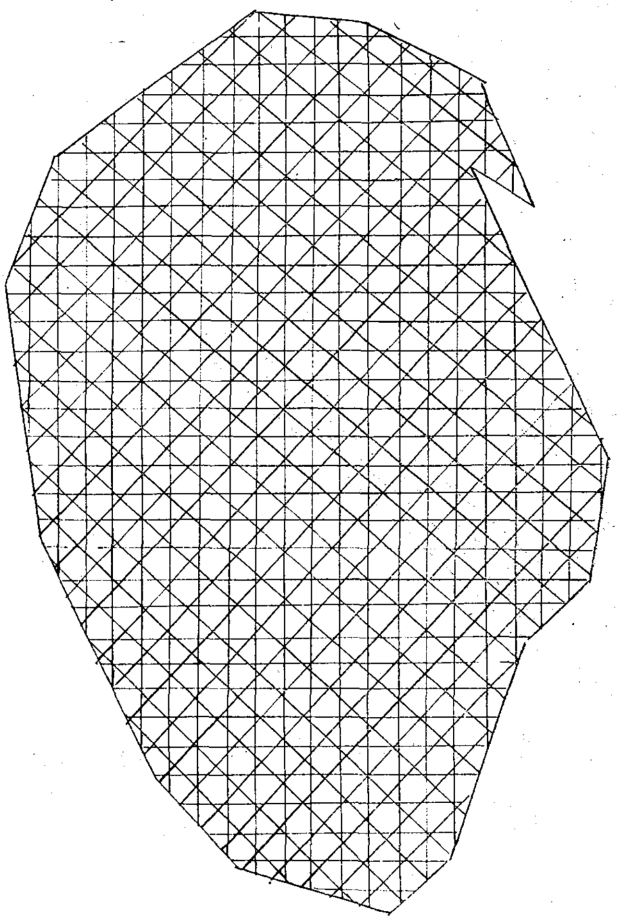


Рис. 4.3. Схема Больше-Топольненского водохранилища, рассеченного системой прямоугольных сеток в целях определения коэффициента трансформации $\bar{M}_{б.\,ср}$.

можность принять среднее для такой формы водоема значение $\bar{M}_{б.\,ср}$ численно равным $L = 0{,}78D$. Пример такого расчета приведен в табл. 4.3 с использованием рис. 4.3.

Особенности расчета $\bar{M}_{б.\,ср}$ для водоемов прямоугольной формы. Исследованы варианты с различными соотношениями длины и ширины, начиная с соотношения 2 : 1. Результаты расчетов показали, что в первом случае при длине прямоугольника около 200 км различия в значениях коэффициента

$\bar{M}_{б.\,ср}$, определенных для всего водоема при самых разнообразных сочетаниях повторяемостей ветра по направлениям не выходили за пределы 0,1. При длине около 20 км эти различия не превышали 0,03, при длине около 2 км — не превышали 0,1, а при длине менее 1 км различий не было. Поэтому для рассматриваемого случая при площади водоема более 5 км^2 рекомендовано вычислять $\bar{M}_{б.\,ср}$ по средней длине разгона $L_{ср} = 0{,}5(L + B)$, где L и B — длина и ширина прямоугольника. Для водоемов с площадью менее 5 км^2 коэффициент $\bar{M}_{б.\,ср}$ можно определять только по длине. Учитывая,

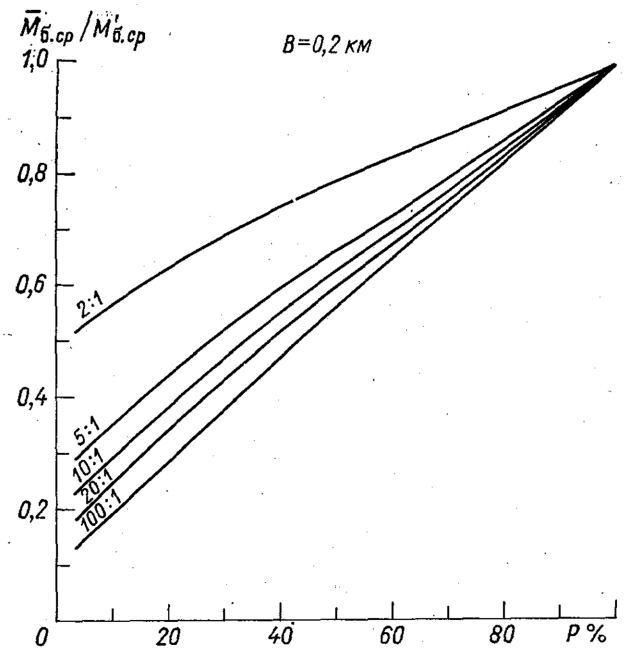


Рис. 4.4. Зависимость среднего значения коэффициента трансформации $\bar{M}_{б.\,ср}$ от повторяемости ветра P, дующего в направлении длинной оси водоема, и значений $\bar{M}'_{б.\,ср}$ при различных соотношениях длины и ширины водохранилища.

что погрешность определения коэффициента $\bar{M}_{б.\,ср}$, равная 0,1, не может существенно влиять на надежность определения $E_в$ (см. п. 3.4.2), предлагаемый прием следует считать достаточно обоснованным.

Для случаев, когда отношение длины прямоугольника к ширине составляло 10 : 1 и более, значения коэффициентов $\bar{M}_{б.\,ср}$ для всего водоема, определенные при различных сочетаниях повторяемости ветров разных направлений, различались более существенно. Так, при длине прямоугольника 250 км эти различия достигли 0,3—0,4 (прил. 4 и 5), при длине 25 км — 0,2, при длине 2 км — 0,1. Следовательно, для малых водоемов, имеющих площадь водного зеркала до 5 км^2, коэффициент $\bar{M}_{б.\,ср}$ можно определять так

же, как для предыдущего случая. Для определения этого коэффициента применительно к водоемам большей площади, имеющих прямоугольную форму, при отношении длины к ширине 10 : 1 и более рекомендовано использовать графики связи между повторяемостями ветра, дующего в направлении длинной оси водоема, имеющего прямоугольную форму, и отношением среднего для водоема значения $\overline{M}_{б.\,ср}$ к его значению $M'_{б.\,ср}$, определенному по длине разгона, соответствующей длине водоема прямоугольной формы. Графики, составленные для значений ширины водохранилищ 0,5, 1, 2, 5 и 10 км, приведены в прил. 6. На рис. 4.4 приведен такой график для ширины водохранилища 0,2 км. Очевидно, что такие графики можно построить для любых соотношений длины и ширины.

Предлагаемые приемы определения значений $\overline{M}_{б.\,ср}$ для водоемов округлой и прямоугольной форм исключают необходимость трудоемких построений и расчетов. Учитывая, что многие озера и водохранилища имеют такие или близкие к ним очертания, выигрыш от замены большого рутинного труда, который неизбежен при использовании существующей методики определения $\overline{M}_{б.\,ср}$ [150], несомненен. Это подтвердили результаты проверочных расчетов, выполненных на примере 14 озер и водохранилищ раз-

Таблица 4.4

Среднее значение коэффициента трансформации $\overline{M}_{б.\,ср}$ для ряда крупных водохранилищ, имеющих форму, близкую к прямоугольной

Водохранилище	Площадь при НПУ, км²	Длина L, км	Максимальная длина разгона, км	Направление по максимальной длине разгона	Средняя ширина B км	L/B	$M'_{б.\,ср}$	Повторяемость ветра по направлению максимальной длины разгона, %	$\frac{\overline{M}_{б.\,ср}}{M'_{б.\,ср}}$	$\overline{M}'_{б.\,ср}$	
										по предлагаемой методике	по существующей методике
Новосибирское	1070	160	160	С — Ю	7	23/1	0,57	22	0,60	0,34	0,33
Рыбинское	4550	112	112	СЗ — ЮВ	41	3/1	0,52	27	0,80	0,42	0,43
Киевское	922	90	90	С — Ю	10	9/1	0,50	21	0,70	0,35	0,34
Мингечаурское	605	64	40	СЗ — ЮВ	10	6/1	0,41	66	0,88	0,36	0,34
Иваньковское	327	42	28	ЮЗ — СВ	8	5/1	0,37	34	0,77	0,28	0,28

Примечания: 1. Максимальную длину разгона определяют по одному из четырех направлений С — Ю, З — В, СЗ — ЮВ, СВ — ЮЗ. 2. Значение $\overline{M}_{б.\,ср}$ определяют по максимальной длине разгона.

личных размеров. В табл. 4.4 приведены результаты расчетов по предложенной методике для ряда крупных водохранилищ СССР.

4.3. Методы определения температуры поверхности воды водоема

4.3.1. Существующие методы расчета температуры поверхности воды водоема. Учет степени проточности водохранилищ при определении температуры поверхности воды

В настоящее время для оценки температуры поверхности воды водоемов применяют несколько методов. Простейшим приемом является использование метода аналогии. При этом водоемы не должны различаться по условиям питания, а также по площади и глубине. Эти критерии указаны в действующих Указаниях [150], в которых и рекомендовано использовать метод аналогии. Вместе с тем, совершенно очевидно, что при использовании данного метода возможны значительные погрешности при определении температуры воды из-за неудачного выбора водоема-аналога. Именно поэтому данный метод практически не используют ни при расчетах водных балансов озер и водохранилищ, выполняемых сетевыми подразделениями Госкомгидромета СССР, ни при оценках температуры воды водоемов при выполнении научно-исследовательских и проектных работ.

Помимо метода аналогии в Указаниях [150] рекомендована также расчетная схема по оценке температуры воды водоема при отсутствии непосредственных данных наблюдений, основанная на решении уравнения теплового баланса водоема. Прежде чем перейти к анализу указанной расчетной схемы, надо обратить внимание на то, что до последнего времени для решения рассматриваемой задачи совершенно не использованы материалы систематических наблюдений за температурой воды в испарителях и испарительных бассейнах, установленных в различных районах СССР. Первое исследование в данной области было выполнено В. И. Кузнецовым [103], который на основании анализа данных по температуре поверхности воды в наземных испарителях ГГИ-3000 и в испарительных бассейнах площадью 20 м^2 предложил для расчета среднемесячной температуры поверхности воды в бассейне (t_{20}) общее уравнение

$$t_{20} = mt_{0,3} + g, \tag{4.12}$$

где $t_{0,3}$ — температура воды в испарителе ГГИ-3000; m и g — эмпирические параметры, зависящие от местоположения пункта наблюдений и определяемые графическим способом.

В. С. Голубев и К. М. Кокорева установили [71], что эти эмпирические параметры зависят не столько от местоположения испарительной площадки, сколько от наличия или отсутствия травя-

нистой растительности на ней. В результате выполненных исследований они предложили расчетные формулы, основанные на решении уравнения регрессии;

для площадок с луговой растительностью:

$$t_{20} = 0{,}994t_{0,3} + 1, \tag{4.13}$$

для площадок с оголенной почвой:

$$t_{20} = 0{,}96t_{0,3} + 0{,}7. \tag{4.14}$$

Сопоставление рассчитанных по формулам (4.13) и (4.14) значений температуры воды в испарительном бассейне с данными непосредственных наблюдений, полученных на водно-испарительных площадках, расположенных на территории от 38 до 62° с. ш. показало, что максимальная погрешность расчета по указанным уравнениям не превысила 1 °С, а среднеквадратическое отклонение расчета составило 0,3 °С. Расчетные зависимости (4.13) и (4.14) использованы Голубевым и Кокоревой для построения карт средних многолетних месячных значений температуры воды для теплого периода года в наземном испарительном бассейне площадью 20 м² и глубиной 2 м. Расчеты для построения карт были выполнены для 280 пунктов за период 1961—1970 гг. Карты опубликованы в работе [71]. Дальнейшей задачей был переход от значений температуры воды в испарительном бассейне площадью 20 м² к температуре поверхности воды реального водоема. Для решения данной задачи применительно к озерам их разделили на три группы в зависимости от глубины. Для каждой группы озер Голубев получил уравнения, позволяющие определять поправки к значениям температуры воды, снимаемым с карт. Введение этих поправок позволяет определять среднюю по акватории озера температуру поверхности воды.

Рассмотрена возможность использования описанной методики для определения температуры поверхности воды водохранилищ. Основное отличие искусственно создаваемых водохранилищ от озер заключается в том, что первые в большинстве случаев (исключая водохранилища, созданные в результате подпора крупных озер) характеризуются значительной проточностью. Этот фактор нельзя не учитывать, так как при прохождении через водохранилище больших объемов речных вод температура поверхности воды будет в значительной мере определяться температурой воды, поступающей в водохранилище, а не гидрометеорологическими условиями в районе водохранилища и внутриводоемными процессами. В качестве характеристики проточности водохранилища в отдельные месяцы ($T_{у.м}$) принято отношение среднего месячного объема воды в водохранилище к показателю внешнего водообмена A:

$$T_{у.м} = \bar{W}_м / A. \tag{4.15}$$

В формуле (4.15) показатель внешнего водообмена характеризуется суммой притока и осадков: $A = (I + P)$.

Таблица 4.5

Среднемесячная температура поверхности воды водоемов, рассчитанная по изложенной методике ($t_в$) и полученная по данным непосредственных измерений ($t_и$), разность $\Delta t = t_в - t_и$ и характеристика проточности ($T_{у.м}$) водохранилищ первой группы для месяцев теплого периода года

Водохранилище	Площадь при НПУ, км²	Глубина, м		Градус северной широты	Расчетная характеристика	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
		средняя	максимальная									
Иваньковское	327	3,4	18	57	$T_{у.м}$		0,9	1,7	1,7	2,0	2,1	1,7
					$t_в$		13,6	18,6	19,6	18,5	12,7	6,1
					$t_и$		12,5	18,0	20,5	19,2	14,0	6,8
					Δt		1,1	0,6	—0,9	—0,7	—1,3	—0,7
Киевское	922	4	14,5	51	$T_{у.м}$		0,6	1,2	1,6	1,8	2,3	2,1
					$t_в$		15,8	20,0	22,3	20,8	15,8	8,9
					$t_и$		16,3	20,1	21,1	20,9	16,2	8,8
					Δt		—0,5	—0,1	1,2	—0,1	—0,6	0,1
Печенежское	86	4,6	20	50	$T_{у.м}$		7,4	9,0	8,5	10,7	10,0	7,3
					$t_в$		16,3	19,9	22,5	22,1	16,4	9,4
					$t_и$		16,2	20,2	22,5	21,6	17,0	9,8
					Δt		0,1	—0,3	0,0	0,5	—0,6	—0,4

Днепродзержинское	567	4,3	16	49	$T_{у.м}$	0,4	0,4	0,6	0,8	0,8	0,9	0,8
					$t_в$	8,2	16,6	20,8	24,2	22,5	16,9	10,0
					$t_и$	6,8	15,5	20,3	22,7	22,3	17,9	11,5
					Δt	1,4	1,1	0,5	1,5	0,2	—1,0	—1,5
Кременчугское	2252	6,0	20	49	$T_{у.м}$	0,9	1,5	3,4	5,0	5,7	5,3	4,5
					$t_в$	7,9	16,1	20,3	23,2	21,0	16,3	10,4
					$t_и$	7,2	16,2	20,7	22,8	22,0	17,5	11,6
					Δt	0,7	—0,1	—0,4	0,4	—0,1	—1,2	—1,2
Краснооскольское	122	3,8	20	49	$T_{у.м}$	1,2	4,8	6,7	7,5	8,6	8,2	6,8
					$t_в$	7,7	16,1	19,8	22,7	22,1	16,9	9,6
					$t_и$	8,6	16,8	21,1	23,2	22,0	17,0	10,1
					Δt	—0,9	—0,7	—1,3	0,5	0,1	—0,1	—0,5
Самаркандское	75	3,3	12,5	40	$T_{у.м}$		11,5	22,0	20,0	63,3	45,0	42,5
					$t_в$		13,4	18,6	20,8	19,0	12,9	6,3
					$t_и$		12,4	19,0	21,6	19,1	14,3	6,4
					Δt		1,0	—0,4	—0,8	—0,1	—1,4	—0,1
Тедженское II	42	4,6	18	37	$T_{у.м}$	0,7	1,3	9,0	—	—	—	—
					$t_в$	15,3	21,2	23,6	26,6	25,8	21,9	17,8
					$t_и$	16,7	21,6	24,7	25,9	25,0	21,2	16,8
					Δt	—1,4	—0,4	—1,1	0,7	0,8	0,7	1,0

Примечание. Измеренные данные заимствованы из работы [53] или из справочника «Основные гидрологические характеристики».

По указанной методике сначала рассчитана температура поверхности воды водохранилищ первой группы, имеющих среднюю глубину не более 6 м и максимальную не менее 20 м. Поправки к температуре воды ($\Delta t_{ак}$) рассчитаны по формуле из работы [72]:

$$\Delta t_{ак} = 0{,}547\tau + 1{,}028\,\Delta\tau - 0{,}031 h_{\odot} - 257\,\Delta h_{\odot} - 7{,}32. \quad (4.16)$$

Обозначения символов, стоящих в правой части, даны при описании формулы (3.26). Приведенные в табл. 4.5 данные показывают, что различие (Δt) определенных по картам и уточненных введением поправки по формуле (4.16) расчетных значений температуры ($t_{в}$) и осредненных измеренных ее значений ($t_{и}$) не превысило $\pm 1{,}5$ °С. При этом среднеквадратическое отклонение при определении температуры поверхности воды рассмотренным расчетным методом для водохранилищ этой группы составило 0,8 °С, хотя значения характеристики проточности для них изменяются в широких пределах 0,40—63. Следовательно, степень проточности водохранилищ первой группы несущественна при оценке температуры поверхности воды по предложенной методике.

Ко второй группе отнесены водохранилища со средней глубиной от 6 до 12 м, а также водохранилища со средней глубиной до 6 м, имеющие максимальную глубину более 20 м. Для этой группы поправки к значениям изотерм на картах достигают 5 °С, их рассчитывают по уравнению

$$\Delta t_{ак} = 0{,}410\tau + 0{,}041\,\Delta\tau - 0{,}072 h_{\odot} - 0{,}199\,\Delta h_{\odot} - 4{,}02. \quad (4.17)$$

Результаты выполненных расчетов показали, что для водохранилищ второй группы, имеющих площадь водной поверхности более 500 км^2, характеристика проточности является определяющей (табл. 4.6). Так, при незначительной проточности водохранилища ($T_{у.\,м} > 1{,}3$) разность вычисленных с помощью формулы (4.17) и карт и полученных по данным непосредственных измерений среднемесячных значений температуры не превышали ± 2 °С. Только для Рыбинского и Кайраккумского водохранилищ эта разность за отдельные весенние месяцы достигала $\pm 3{,}7$ °С, что объясняется специфическим характером водообмена этих водохранилищ в указанные месяцы.

Установлено, что расчеты температуры поверхности воды по изложенной методике для водохранилищ площадью более 500 км^2, относящихся ко второй группе и имеющих значительную проточность ($T_{у.\,м} < 1{,}3$), имеют существенные погрешности, и поэтому их нельзя проводить на практике.

Степень проточности водохранилищ второй категории, имеющих площадь водной поверхности менее 500 км^2, учитывать не обязательно. Несмотря на изменения месячных значений показателя проточности таких водохранилищ от 0,1 до 3 различия рассчитанных и полученных по данным измерений значений температуры воды не превышали в подавляющем большинстве случаев ± 2 °С. Такая картина характерна для Павловского, Днепровского, Дубоссарского и Каттакурганского водохранилищ. Лишь для Угличского

водохранилища указанные различия составили для мая 4,3 (при $T_{у.\,м} = 0{,}8$), а для сентября — 3,2 °С (при $T_{у.\,м} = 3{,}0$), что, по-видимому, связано с более сложным характером температурного режима данного водохранилища в месяцы переходных сезонов.

К третьей группе отнесены водохранилища со средней глубиной более 12 м. Для водоемов этой группы коэффициенты уравнений, подобных (4.17), оказались неустойчивыми. Это может быть связано как с недостаточностью исходной информации, так и с недоучетом специфических условий формирования термического режима поверхностных слоев воды глубоких водоемов. Глубоководные водохранилища, как правило, имеют большие размеры акватории, и температура поверхности воды в них формируется не столько под влиянием таких внешних факторов, как приход суммарной солнечной радиации, сколько за счет процессов внутри водоемов, вызывающих горизонтальную неоднородность температуры поверхности воды, учет которой не предусмотрен разработанной методикой.

Таким образом, материалы наблюдений за температурой поверхности воды в испарителях ГГИ-3000 и испарительных бассейнах площадью 20 м^2, накопленные на сети водно-испарительных площадок, могут быть использованы для оценки среднемесячной многолетней температуры поверхности воды всех проектируемых водохранилищ, относящихся к первой группе водоемов по характеристике проточности и тех водохранилищ второй группы, площадь водной поверхности которых при НПУ не превышает 500 км^2.

Наиболее широко используемый в настоящее время способ определения среднемесячной температуры поверхности воды водоема по данным континентальных метеостанций, рекомендованный Указаниями [150], основан на приближенном решении уравнения теплового баланса водоема. Авторами данной методики являются А. П. Браславский и З. А. Викулина, впервые опубликовавшие ее в 1953 г. В последующем Браславский внес некоторые усовершенствования в методику [29, 37, 38], хотя принципиальные ее основы и предложенное графоаналитическое решение поставленной задачи не изменялись. Разработанная указанными авторами схема расчета температуры поверхности воды основана на решении уравнения теплового баланса водоема в следующем виде

$$S_р + S_а + S_г - S_{изл} - S_{исп} + S_к = C\rho\mu H (t_к - t_н)/\Delta\tau, \qquad (4.18)$$

где $S_р$ и $S_а$ — поглощенные водой суммарная солнечная радиация и встречное излучение атмосферы; $S_г$ — теплообмен водной массы с грунтом дна водоема; $S_{изл}$ и $S_{исп}$ — теплоотдача поверхности водоема путем излучения и испарения; $S_к$ — теплообмен между поверхностью водоема и атмосферой путем турбулентной конвекции; $\Delta\tau$ — продолжительность расчетного интервала времени, сут; C — удельная теплоемкость воды; ρ — плотность воды; μ — коэффициент, представляющий собой отношение средней температуры воды на вертикали к поверхностной; H — средняя глубина водоема;

Таблица 4.6

Среднемесячная температура поверхности воды, рассчитанная по изложенной методике ($t_в$) и полученная по данным непосредственных измерений ($t_и$), разность $\Delta t = t_в - t_и$ и характеристика проточности ($T_{у.м}$) водохранилищ второй группы для месяцев теплого периода года

Название водохранилища	Площадь при НПУ, км²	Глубина, м		Градус северной широты	Расчетная характеристика	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
		средняя	максимальная									
Рыбинское	4550	5,6	30,4	58	$T_{у.м}$		3,6	9,3	11,8	13,6	13,7	9,1
					$t_в$		12,8	17,2	19,3	18,0	12,1	5,5
					$t_и$		9,1	16,6	19,9	19,4	13,4	5,8
					Δt		3,7	0,6	—0,6	—1,5	—1,3	—0,3
Воткинское	1120	8,4	28,0	57	$T_{у.м}$		0,7	1,3	2,1	2,3	2,5	—
					$t_в$		9,7	15,2	19,8	18,4	12,4	—
					$t_и$		6,2	15,0	19,8	18,9	14,0	—
					Δt		3,5	0,2	0,0	—0,5	—1,6	—
Горьковское	1591	5,5	22,0	57	$T_{у.м}$		1,2	2,5	2,4	2,7	2,7	2,6
					$t_в$		13,6	18,1	19,9	18,0	13,0	5,6
					$t_и$		8,4	16,3	20,5	19,6	14,5	7,2
					Δt		5,2	1,8	—0,6	—1,6	—1,5	—1,6
Угличское	249	4,5	23,2	57	$T_{у.м}$		0,8	1,7	2,2	2,6	3,0	2,1
					$t_в$		13,4	17,6	19,8	18,0	12,2	6,6
					$t_н$		9,1	16,6	19,9	19,4	15,4	8,5
					Δt		4,3	1,0	—0,1	—1,4	—3,2	—1,9
Павловское	120	11,8		56	$T_{у.м}$		0,6	0,5	1,7	2,1	2,5	
					$t_в$		10,6	16,5	20,8	19,5	13,8	
					$t_и$		9,9	16,6	21,2	19,6	14,5	
					Δt		0,7	—0,1	—0,4	—0,1	—0,7	
Камское	1915	6,4	30,0	56	$T_{у.м}$		—	1,5	3,1	3,7	3,4	
					$t_в$		—	14,5	19,8	17,7	11,8	
					$t_и$		—	14,7	20,1	18,0	12,3	
					Δt		—	—0,2	—0,3	—0,3	—0,5	
Куйбышевское	6450	9,0	32,0	54	$T_{у.м}$		1,0	2,2	3,4	3,9	4,0	3,7
					$t_в$		11,0	17,8	21,5	20,2	15,0	7,3
					$t_и$		10,2	18,0	21,0	20,2	14,8	7,4
					Δt		0,8	—0,2	0,5	0,0	0,2	—0,1

Новосибирское	1070	8,2	28,0	54	$T_{у.м}$		0,6	0,8	1,2	1,8	2,4	—
					$t_в$		10,3	15,1	22,5	19,0	13,2	—
					$t_и$		8,0	16,9	21,5	19,8	13,9	
					Δt		2,3	—1,0	1,0	—0,8	—0,7	
Волгоградское	3117	10,1	41,0	50	$T_{у.м}$	1,3	0,6	1,3	1,9	2,0	2,1	2,0
					$t_в$	6,0	13,3	18,5	23,8	21,9	16,3	9,5
					$t_и$	2,1	9,1	17,3	21,8	21,6	17,9	11,1
					Δt	—3,9	4,2	1 2	2,0	0,3	—1,6	—1,6
Бухтарминское	5470	9,0	80,0	48	$T_{у.м}$		5,4	5,2	11,2	17,7	26,0	
					$t_в$		12,0	17,7	20,7	19,3	14,2	
					$t_и$		12,0	19,3	22,7	20,8	15,0	
					Δt		0	—1,6	—2,0	—1,5	—0,8	
Днепровское	410	8,1	53,0	48	$T_{у.м}$	0,5	0,5	0,8	1,0	1,1	1,2	1,0
					$t_в$	6,8	15,0	20,2	23,7	23,6	18,7	11,4
					$t_н$	6,9	16,4	20,7	23,5	22,9	19,8	13,0
					Δt	—0,1	—1,4	—0,5	0,2	0,7	—1,1	—1,6
Цимлянское	2702	8,8	35,0	48	$T_{у.м}$	3,0	4,3	15,9	21,7	25,6	26,0	23,7
					$t_в$	7,3	14,5	20,2	23,7	22,6	18,2	10,9
					$t_и$	7,3	15,5	21,1	23,8	23,2	18,6	12,1
					Δt	0,0	—1,0	—0,9	—0,1	0,4	—0,4	—1,2
Дубоссарское	67	7,2	18,0	47	$T_{у.м}$	0,3	0,5	0,4	0,4	0,6	0,6	0,7
					$t_в$	8,2	14,8	19,1	22,0	22,6	19,1	12,3
					$t_и$	9,5	16,8	21,1	23,0	22,2	17,9	12,1
					Δt	—1,3	—2,0	—2,0	—1,0	0,4	1,2	0,2
Каховское	2155	8,4	24,0	47	$T_{у.м}$	2,1	2,3	4,1	5,4	5,8	6,8	5,6
					$t_в$	7,7	15,4	20,1	23,5	24,1	19,6	12,8
					$t_и$	6,2	14,9	20,7	23,3	22,7	19,0	13,2
					Δt	1,5	0,5	—0,6	0,2	1,4	0,6	—0,4
Каттакурганское	65	10,2	24,5	40	$T_{у.м}$	0,1	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3	0,1
					$t_в$	12,2	17,6	21,2	23,8	22,8	20,3	14,9
					$t_и$	14,1	19,0	22,5	24,0	23,0	19,4	14,4
					Δt	—1,9	—1,4	—1,3	—0,2	—0,2	0,9	0,5
Кайраккумское	513	8,1	25,0	40	$T_{у.м}$	1,8	1,3	1,1	1,3	1,4	1,6	1,4
					$t_в$	11,3	16,6	21,2	25,5	24,8	20,6	15,9
					$t_и$	15,0	20,2	25,3	26,1	24,8	20,8	15,3
					Δt	—3,7	—3,6	—4,1	—0,6	0,0	—0,2	0,6

$t_н$ и $t_к$ — температура поверхности воды в начале и конце расчетного интервала времени.

Теплоотдача поверхности воды путем излучения оценена по формуле

$$S_{изл} = 0{,}96\sigma^* (273{,}16 + t_0)^4, \qquad (4.19)$$

где t_0 — средняя за расчетный период температура поверхности водоема; σ^* — постоянная Стефана — Больцмана, равная $49{,}75 \times 10^{-8}$ Дж/(см^2·сут·°С^4).

Для расчета параметров $S_р$, $S_а$ и $S_г$ Браславский и Викулина предложили расчетные зависимости, основанные на использовании данных стандартных наблюдений за радиационными характеристиками, облачностью, температурой и влажностью воздуха на континентальных метеостанциях. Рекомендации по определению этих параметров даны в Указаниях [150]. В последующем формулы по расчету указанных параметров Браславский уточнял без изменения их структуры. Для определения параметров формулы (4.18) $S_{исп}$ и $S_к$ предложены следующие приемы. В качестве основы для расчета $S_к$ использовано следующее выражение, вытекающее из теории турбулентного обмена, если полагать коэффициенты вертикального обмена для паров воды и тепла одинаковыми:

$$S_к/E = C_P (t_2 - t_0)/(q_0 - q_2), \qquad (4.20)$$

где E — испарение, г/(см^2·сут); C_P — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; q_2 и q_0 — удельная влажность воздуха на высоте 2 м от поверхности воды и у ее поверхности соответственно.

С учетом того, что $C_P = 1$ Дж/(г·°С^4), а $q = 0{,}623e/P = (0{,}623/1013)\,e = 0{,}615 \cdot 10^{-3}e$, гПа; где P — атмосферное давление; выражение (4.20) можно привести к виду

$$S_к = 1626E (t_2 - t)/(e_0 - e_2). \qquad (4.21)$$

Теплоотдачу воды за счет испарения рассчитывают по формуле

$$S_{исп} = L^*E = 2{,}5 \cdot 10^3 E. \qquad (4.22)$$

В формулах (4.21) и (4.22) $S_к$ и $S_{исп}$ в Дж/(см^2·сут), $L^* = 2{,}5 \cdot 10^3$ Дж/г — удельная теплота испарения.

Дальнейший расчет значений $S_к$ и $S_{исп}$ по выражениям (4.21) и (4.22) зависит от того, какая зависимость будет использована для определения испарения E. Вначале Браславский и Викулина предложили использовать для определения слоя испарения в сантиметрах формулу Б. Д. Зайкова

$$E = 0{,}015 (1 + 0{,}72\omega_2)(e_0 - e_2). \qquad (4.23)$$

Несколько позже для оценки испарения было предложено использовать формулу Браславского и Викулиной, в которой первый сомножитель правой части формулы (4.23) равен 0,013 [33]. Кстати, приведенная в Указаниях [150] расчетная схема по определению температуры поверхности водоема, основанная на решении уравнения (4.18), предусматривает использование для расчета ис-

парения формулы (4.23) с коэффициентом 0,015, в то время как в другом разделе Указаний в качестве расчетной формулы по оценке испарения рекомендована формула ГГИ с коэффициентом 0,014. Если подставить выражение, принятое для расчета E, в формулы (4.21) и (4.22) и перейти от температуры и влажности воздуха над водоемом к этим характеристикам, соответствующим условиям континентальной метеостанции, с использованием следующих выражений:

$$e_2 = e'_2 + (0{,}8e_0 - e'_2)\,\bar{M}_{\text{б. ср}}, \tag{4.24}$$

$$t_2 = t'_2 + (t_0 - t'_2)\,\bar{M}_{\text{б. ср}}, \tag{4.25}$$

то с учетом некоторых преобразований можно получить следующие формулы:

$$S_{\text{к}} = a_3 t'_2 - a_3 t_0, \tag{4.26}$$

$$S_{\text{исп}} = a_5 e_0 - a_6 e'_2. \tag{4.27}$$

В двух последних формулах коэффициенты a_3, a_5 и a_6 определяют по зависимостям:

$$a_3 = k_1(1 + 0{,}72\omega_2)(1 - \bar{M}_{\text{б. ср}}), \tag{4.28}$$

$$a_5 = k_2(1 + 0{,}72\omega_2)(1 + 0{,}8\bar{M}_{\text{б. ср}}), \tag{4.29}$$

$$a_6 = k_2(1 + 0{,}72\omega_2)(1 - \bar{M}_{\text{б. ср}}). \tag{4.30}$$

В формулах (4.24) и (4.25) e'_2 — абсолютная влажность воздуха, определяемая по данным континентальной метеостанции; e_0 — давление насыщенного водяного пара, определяемое по температуре поверхности воды в водоеме; $\bar{M}_{\text{б. ср}}$ — осредненный коэффициент трансформации воздушного потока при переходе с суши на водоем; t'_2 — температура воздуха на континентальной метеостанции; t_0 — температура поверхности воды водоема.

Значения коэффициентов k_1 и k_2 в формулах (4.28)—(4.30) зависят от того, какая расчетная формула принята для определения испарения E. Если это формула (4.23), то $k_1 = 24{,}39$, $k_2 = 37{,}38$; если формула ГГИ, принятая в Указаниях [150], то $k_1 = 22{,}76$, $k_2 = 34{,}89$; если формула Браславского и Викулиной, то $k_1 = 21{,}14$, $k_2 = 32{,}40$. С учетом зависимостей (4.19), (4.21) и (4.22) формулу (4.18) приводят к виду

$$0{,}96\sigma^*(273{,}16 + t_0)^4 - a_3 t_0 + a_5 e_0 + \frac{2\mu HC\rho}{\Delta\tau} t_0 =$$

$$= S_{\text{р}} + S_{\text{а}} + a_3 t'_2 + a_6 e'_2 + S_{\text{г}} + \frac{2\mu HC\rho}{\Delta\tau} t_{\text{н}}. \tag{4.31}$$

Далее из этого уравнения определяют среднее значение температуры поверхности воды за расчетный интервал времени при условии, что $t_0 = (t_{\text{к}} + t_{\text{н}})/2$.

Для облегчения расчетов по формуле (4.31) построены серии графиков, а в Указаниях [150] приведена расчетная схема, включающая в себя расчет сначала установившейся температуры воды для условного водоема, а затем переход к температуре реального водного объекта.

Изложенная расчетная методика обладает рядом недостатков:

1) большая трудоемкость расчетов при прямых вычислениях по формуле (4.31), при использовании графиков снижение точности вычислений;

2) трудоемкость вычисления длины разгона воздушного потока над водоемом при определении коэффициента $\bar{M}_{б.\,ср}$;

3) изменчивость коэффициентов k_1 и k_2 в формулах (4.28)—(4.30) в зависимости от принятой расчетной схемы определения испарения E;

4) отсутствие указаний на то, с какого месяца необходимо вести расчеты температуры воды для незамерзающих водоемов, а также большая субъективность при реализации указания об определении начальной температуры воды для незамерзающих водоемов по методу аналогии.

В связи с указанными недостатками предложена усовершенствованная и упрощенная расчетная схема определения температуры поверхности воды водоема с использованием данных континентальных метеостанций.

4.3.2. Предлагаемая методика расчета температуры поверхности воды водоема

Разработанная методика основана также на решении уравнения теплового баланса водоема (4.18), но при этом она существенно изменена с учетом выполненных исследований. Прежде всего, в целях упрощения определения $S_к$ и $S_{исп}$ по формулам (4.26) и (4.27) была рассмотрена возможность использования для вычисления значений E следующего выражения:

$$E = b\omega_2 (e_0 - e_2). \qquad (4.32)$$

Как известно, большинство существующих эмпирических формул для расчета испарения в основе своей имеют именно такую структуру. Коэффициент b связан с шероховатостью подстилающей поверхности и температурной стратификацией атмосферы. Более подробно этот коэффициент рассмотрен в работах [33, 92, 97]. С использованием многочисленных материалов водно-испарительной сети были определены обратным путем по формуле (4.32) значения коэффициента b для различных водоемов СССР. Результаты расчетов позволили установить, что значения этого коэффициента лежат в пределах 0,01—0,02, а среднее его значение можно принять равным 0,015. О правомерности принятия для расчетов по формуле (4.32) указанного единого значения этого коэффициента свидетельствует рис. 4.5. На этом рисунке приведена зависимость коэффициента b от скорости ветра над водоемом на вы-

соте 2 м — ω_2. Графики получены с использованием выражения $b = a(1 + 0{,}72\omega_2)$ для различных значений параметра a. На этом же рисунке проведена прямая, соответствующая значению $b = 0{,}015$. Как можно убедиться, при скорости ветра от 2 до 4 м/с, значения коэффициента b близки к 0,015. При этом наиболее близкие к этому значению значения коэффициента b получены при использовании формулы ГГИ. Учитывая, что среднемесячные значения скорости ветра над водоемами лежат в основном в интервале

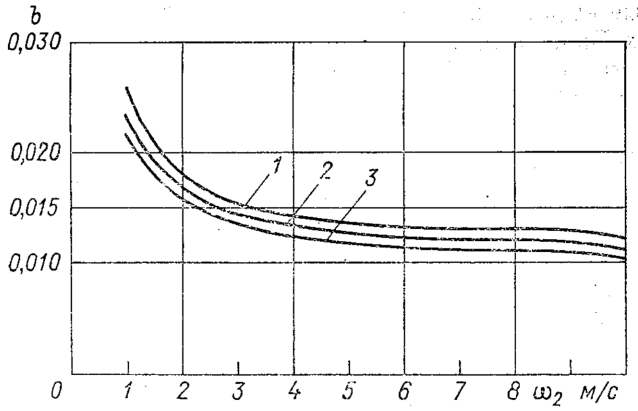


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента b от скорости ветра над водоемом на высоте 2 м (ω_2), определенная по формулам Б. Д. Зайкова (*1*), ГГИ (*2*), А. П. Браславского и З. А. Викулиной (*3*).

2—4 м/с, а также принимая во внимание результаты расчетов коэффициента b по натурным данным, в расчетной схеме принято значение коэффициента $b = 0{,}015$. Кроме того, также принято постоянным значение осредненного коэффициента трансформации для условий водоема $\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}25$. Обоснование возможности принятия такого решения дано в п. 3.4.2.

С учетом изложенного формулы (4.26) и (4.27) примут следующий вид:

$$S_к = 18{,}29\omega_2 (t'_2 - t_0), \tag{4.33}$$

$$S_{исп} = 30\omega_2 e_0 - 28{,}1\omega_2 e'_2. \tag{4.34}$$

Окончательное выражение для расчета среднемесячной температуры поверхности воды водоема с учетом зависимостей (4.18), (4.33) и (4.34) будет следующим:

$$S_р + S_а + 18{,}29\omega_2 t'_2 + 28{,}1\omega_2 e'_2 + S_г + \frac{2C\rho\mu H}{\Delta\tau} t_н =$$

$$= 0{,}96\sigma^* (273{,}2 + t_0)^4 + 18{,}29\omega_2 t_0 + 30\omega_2 e_0 + \frac{2C\rho\mu H}{\Delta\tau} t_0. \tag{4.35}$$

Обозначив левую и правую части через Φ_1 и Φ_2 и выражая все тепловые потоки в Дж/(см^2·сут), получаем следующие выражения:

$$\Phi_1 = S_р + S_а + 18{,}29\omega_2 t'_2 + 28{,}1\omega_2 e'_2 + S_г + 275{,}5 \cdot 10^{-3} \mu H t_н, \quad (4.36)$$

$$\Phi_2 = 4{,}776 \cdot 10^{-7} (273{,}2 + t_0)^4 + \omega_2 (18{,}29 t_0 + 30 e_0) + 275{,}5 \cdot 10^{-3} \mu H t_0. \quad (4.37)$$

Данные выражения, несколько отличные от зависимостей, предложенных Браславским, рекомендованы для расчета температуры поверхности воды водоемов. Сначала определяют значения Φ_1 по зависимости (4.36). При этом значения $S_р$, $S_а$ и $S_г$ можно рассчитывать в соответствии с существующими Указаниями [150]. Данные о температуре t'_2 и влажности e'_2 воздуха принимают по материалам континентальных станций. Скорость ветра над водоемом ω_2 определяют с использованием существующих методик [131, 150]. Произведение μH в соответствии с Указаниями [150] реко-

Таблица 4.7

Среднемесячные значения коэффициента μ для различных водохранилищ СССР

Водохранилище	Средняя глубина, м	Период наблюдений	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Кубенское		1961—65		0,96	0,97	0,98	0,99	0,98	1,00
Топопяозерское	2	1974—77	1,00	1,00	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00
Нарвское		1973—77	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
		Среднее	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00
Выгозерское		1973—77	0,98	0,95	0,93	0,98	1,00	1,00	0,98
Шекснинское	4	1973—77			0,96	0,94	0,98	1,00	1,00
Иваньковское		1973—77		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Угличское		1973—77		0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00
		Среднее	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00
Камское		1962—65	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00
Кременчугское	6	1972—77	0,95	0,95	0,97	0,97	0,97		
		Среднее	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00
Новосибирское		1966—70			0,96	0,98	0,99	1,00	1,00
Кайраккумское	8	1964—67	0,96	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99
Воткинское		1962, 1963, 1965			0,95	0,95	0,98	1,00	1,00
Каховское		1965, 1972	0,97	0,90	0,90	0,98	0,99	0,98	
		Среднее	0,97	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00
Имандровское		1968—71				0,95	0,96	0,98	
Иркутское (без оз. Байкал)	13	1973—77			0,88	0,78	0,82	0,95	0,99
		Среднее			0,88	0,87	0,89	0,97	0,99
Вилюйское	16	1970—74				0,72	0,77	0,95	
Верхне-Туломское		1968—71				0,78	0,89	0,96	0,98
		Среднее				0,75	0,83	0,95	0,98
Мамаканское	18	1974—77			0,8	0,76	0,76	0,89	0,96
Братское	30	1973—77			0,65	0,52	0,6	0,86	0,95

мендовано определять по графику в зависимости от средней глубины водоема и длины разгона воздушного потока. Как показали расчеты коэффициента μ, выполненные на примере 19 водохранилищ СССР, его значения не постоянны для отдельных водохранилищ, а изменяются от месяца к месяцу. Для получения среднемесячных значений коэффициента μ использованы многочисленные данные наблюдений за температурой воды по вертикалям, с последующим их осреднением для акватории водохранилищ. Обобщенные сведения о рассчитанных коэффициентах μ приведены в табл. 4.7. Как показывают данные таблицы, значения этого коэффициента изменяются от месяца к месяцу, а также зависят от глубины водохранилища. На основании этой таблицы составлен график для определения значений μ (рис. 4.6). Так как при составлении графика использованы ограниченные материалы по температуре воды водохранилищ, он нуждается в дальнейшем уточнении.

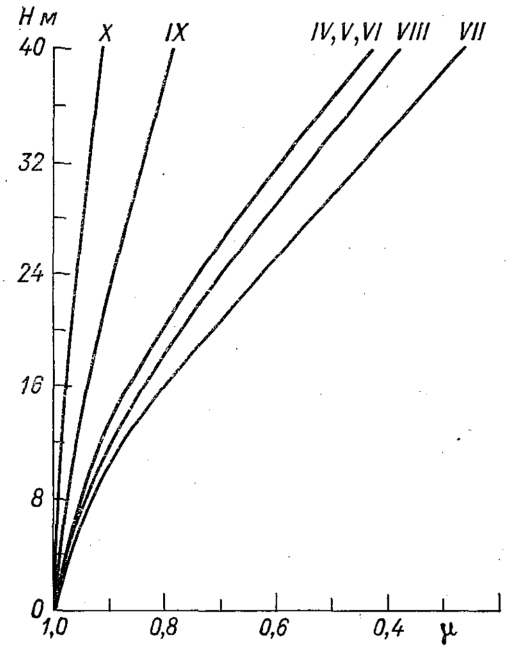


Рис. 4.6. Зависимость средних многолетних месячных значений коэффициента μ от средней глубины водохранилища *H*.

Начальную температуру воды $t_н$ первого расчетного месяца в первые сутки после очищения водоема ото льда весной принимают равной 2,5 °С. Для незамерзающих водоемов предлагаем принимать $t_н = 4{,}0$ °С, т. е. температуру наибольшей плотности воды. Данная рекомендация основана на выполненном анализе среднемесячных значений температуры воды в зимние месяцы для незамерзающих водоемов. Как оказалось, для большинства рассмотренных незамерзающих водоемов самая низкая среднемесячная температура воды, полученная по данным измерений, близка к 4 °С. Расчет при этом рекомендовано начинать с месяца, имеющего самую низкую по сравнению с другими температуру воздуха. Расчет по формуле (4.36) начинают с определения Φ_1 для первого расчетного месяца. В том случае, когда дата очищения водоема ото льда приходится не на первое число месяца, в последнее слагаемое правой части формулы (4.36) вводят коэффициент $\alpha = n/\Delta\tau$, где n — число суток в месяце, считая от первых суток очищения водоема ото льда. После определения значения Φ_1 учитывая, что

$\Phi_1 = \Phi_2$ далее можно определить среднюю температуру поверхности воды водоема для первого расчетного месяца по формуле (4.37). После определения значения t_0 для первого расчетного месяца находят значение $t_к$ из соотношения $t_к = 2t_0 - t_н$. Полученное значение $t_к$ принимают в качестве $t_н$ для следующего расчетного месяца. Однако при расчете за последующие месяцы рекомендовано корректировать полученное значение $t_к$ с использованием выражения

$$t_к = \beta t'_к, \tag{4.38}$$

где $t'_к$ — температура воздуха на конец месяца, измеренная на метеостанции; β — коэффициент, вычисляемый по формуле

$$\beta = t_н/(2t'_н) + t_0/(2t'), \tag{4.39}$$

где $t'_н$ и t' — начальная и среднемесячная температура воздуха, измеренная на метеостанции.

Изложенный прием позволяет более надежно рассчитать $t_к$ с учетом формирования температурного режима над водоемом.

Изложенная методика вошла в нормативный документ по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ [131]. Для облегчения расчетов в прил. 7 приведены значения t_0, определенные по выражению (4.37) в зависимости от Φ_2, ω_2 и средней глубины водоема.

Изложенная методика обладает рядом преимуществ по сравнению с приведенной в Указаниях [150]. Они заключаются в следующем:

1)значительно снижена трудоемкость расчетов. В частности, отсутствует необходимость производить расчеты сначала для «условного» водоема. Полностью исключены из расчетной схемы такие малообоснованные параметры, как установившаяся температура поверхности воды $t_у$, коэффициент $k_к$, поправки Δ, $\Delta t_к$ и $\Delta t_{ср}$. Нет необходимости определять длину разгона воздушного потока над водоемом;

2) дано более обоснованное определение конечного значения температуры поверхности воды $t_к$ путем использования выражения (4.38), основанного на зависимости температуры воды от хода температуры воздуха.

Расчеты, выполненные по изложенной методике с использованием независимого материала, показали ее достаточную надежность. Для 10 крупных водоемов, расположенных в различных районах СССР, рассчитаны среднемесячные значения температуры поверхности воды. При этом расчеты выполнены как для замерзающих водоемов за период открытой водной поверхности, так и для незамерзающих водоемов за весь год. Всего рассчитано 350 среднемесячных значений температуры поверхности воды. В 75 % случаев полученные расчетным путем значения t_0 отличались от измеренных не более чем на ± 1 °С. В отдельных случаях в месяцы переходных сезонов (осени и весны) отклонения достигали ± 2 °С.

Таблица 4.8

Пример расчета среднемесячной температуры поверхности воды Бухтарминского водохранилища у ст. Селезневки в 1970 г. (t_0) по предложенной методике

Месяц	t'_2 °С	e'_2 мб	$S_р$ Дж/(см²сут)	$S_а$ Дж/(см²сут)	$S_т$ Дж/(см²сут)	ω_2 м/с	$18{,}29\omega_2 t'_2$ Дж/(см²сут)	$28{,}03\omega_2 e'_2$ Дж/(см²сут)	$275{,}5\cdot 10^3 \mu H t_н$ = Дж/(см²сут)	$Ф_1$ Дж/(см²сут)	$t_н$ °С	t_0 °С	β	$t_к$ °С	$T_в$ °С	T_{20} °С	$T_у$ °С
V	10,7	9,3	1 537	2 910	—134	2,2	430	575	769	6 087	2,5	6,7		10,9			
VI	16,8	12,5	1 713	3 095	—142	2,0	614	703	3 351	9 334	10,9	14,8	1,1	17,9	16,3	17,5	15,7
VII	19,0	13,9	1 767	3 007	—100	2,4	834	937	5 503	11 948	17,9	19,4	1,01	18,0	18,2	19,5	18,5
VIII	17,5	13,1	1 612	2 768	—38	2,4	768	883	5 534	11 527	18,0	18,6	1,02	16,0	19,3	19,6	18,2
IX	13,9	9,3	1 306	2 567	38	2,1	534	549	4 919	9 913	16,0	15,8	1,08	9,7	16,4	16,3	15,1
X	4,2	5,7	645	3 178	100	2,2	169	352	2 982	7 426	9,7	10,2			11,6	10,3	10,7

Примечание. $T_в$ — средняя температура поверхности водоема по данным измерений. T_{20} и $T_у$ — температура поверхности воды в плавучем испарительном бассейне площадью 20 м² и рассчитанная по Указаниям [150] соответственно.

Такие отклонения наблюдались также при определении t_0 для водохранилищ, обладающих большой проточностью. Пример расчета по предлагаемой методике приведен в табл. 4.8.

Принимая во внимание, что изложенная методика не учитывает влияние на формирование температуры воды тепла, приносимого с притоком или удаляемого со стоком, ее рекомендовано использовать для водохранилищ, имеющих коэффициенты проточности $T_{у.\,м} > 1{,}3$ (см. п. 4.3.1).

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАСЧЕТА ВОДНОГО БАЛАНСА И ЕГО УВЯЗКА. ВОДНЫЙ БАЛАНС КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

5.1. Существующие способы оценки надежности расчета водного баланса

В связи с тем, что отдельные элементы, входящие в уравнение водного баланса, определяют с погрешностями, а некоторые малозначащие компоненты баланса вовсе не учитывают, при численном решении уравнения водного баланса появляется дополнительный член, характеризующий суммарную погрешность расчета и определяемый как невязка баланса. По значению невязки судят о надежности расчета водного баланса.

Как известно, суммарная погрешность определения какого-либо элемента балансового уравнения определяется суммой систематической и случайной погрешностей. Систематические погрешности являются следствием неучета каких-либо постоянно действующих факторов, приводящих к систематическим отклонениям определяемых элементов баланса от их истинных значений. Выявить систематические погрешности можно либо путем сравнения полученного значения элемента с эталоном, либо при анализе невязок уравнения водного баланса. Первый подход применительно к рассматриваемой задаче невозможен, так как неизвестны истинные значения отдельных элементов водного баланса водохранилищ. Второй подход позволяет в некоторых случаях выявить возможные причины систематических погрешностей и попытаться устранить их. В целом, однако, следует отметить, что систематические погрешности определения элементов водного баланса водохранилищ изучены еще довольно слабо. Можно полагать, как это делают, например, при определении элементов водного баланса речных бассейнов, что значения систематических погрешностей малы по сравнению со случайными и ими можно пренебречь.

Случайные погрешности определения отдельных элементов баланса оценивают, как известно, значением среднеквадратического отклонения

$$\sigma_{\bar{i}} = \sigma_i / \sqrt{n}, \qquad (5.1)$$

где σ_i — среднеквадратическое отклонение, n — число членов ряда.

Ориентировочные средние значения случайных погрешностей определения основных элементов водного баланса водохранилищ, заимствованные из работы [124], приведены в табл. 5.1. Для оценки суммарной погрешности расчета водного баланса водохранилища широко используют зависимость

$$\sigma_\delta = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 + \ldots + \sigma_k^2 + 2r_{ij}\sigma_i\sigma_j + \ldots + 2r_{ik}\sigma_i\sigma_k}, \quad (5.2)$$

где r_{ij}, r_{ik} — коэффициенты парной линейной корреляции между элементами водного баланса.

Таблица 5.1

Средние значения случайных погрешностей определения основных составляющих водного баланса водоемов

Элемент баланса	Случайная погрешность определения, %
Измеренный приток (отток)	
на равнинных реках с устойчивым руслом	±5
на горных реках	±(15...20)
на крупных ГЭС	±(2...5)
на малых и средних ГЭС	±(5...8)
Рассчитанный приток	
для равнинных рек	±20
для горных рек	до ±50
Измеренные осадки на поверхность водоема	±20
Испарение с поверхности водоема, рассчитанное по формуле ГГИ	±12,5
Измеренный средний уровень водоема	±(1...2) *
Подземный водообмен	±(50...100)

* Погрешность определения среднего уровня водоема в сантиметрах.

Известно, что при отсутствии корреляционных связей между отдельными элементами баланса рассчитывать σ_δ по формуле (5.2) можно без учета членов, содержащих значения коэффициентов корреляции. Выполненный на примере 22 крупных водохранилищ СССР анализ парных коэффициентов корреляции между элементами водного баланса показал, что практически всегда существует тесная корреляционная связь между двумя основными составляющими уравнения водного баланса — притоком и стоком. Кроме того, нередко ряды осадков и испарения оказываются также корреляционно связанными между собой (табл. 5.2). Поэтому при оценке суммарной погрешности расчета водного баланса водохранилища использование упрощенной зависимости вместо формулы (5.2) неправомерно.

В практике воднобалансовых расчетов водоемов в качестве условия надежности таких расчетов принимают следующее соотношение [124]:

$$-1{,}96\sigma_\delta \leqslant \delta \leqslant 1{,}96\sigma_\delta. \quad (5.3)$$

Таблица 5.2

Парные коэффициенты корреляции между годовыми значениями элементов водного баланса водохранилищ

Водохранилище	Расчетный период	$r_{J_п/Q_п}$	$r_{P/E}$
Братское	1962—80	0,28	0,81
Верхнетуломское	1965—80	0,74	0,75
Воткинское	1966—80	0,99	—0,07
Днепровское	1957—80	0,99	—0,50
Днепродзержинское	1965—80	0,99	—0,77
Иваньковское	1952—80	0,99	0,09
Ириклинское	1963—80	0,89	0,41
Кайраккумское	1957—80	0,98	0,16
Камское	1956—80	0,96	—0,38
Киевское	1967—80	0,99	—0,69
Красноярское	1967—80	0,53	—0,25
Кременчугское	1961—80	0,98	—0,33
Куйбышевское	1957—80	0,93	—0,48
Мингечаурское	1958—80	0,78	—0,37
Новосибирское	1960—80	0,99	—0,12
Павловское	1961—80	0,99	0,25
Рыбинское	1948—80	0,88	0,20
Саратовское	1969—80	0,99	—0,55
Серебрянское	1970—80	0,65	0,11
Угличское	1952—80	0,99	0,20
Цимлянское	1953—80	0,88	—0,13
Шекснинское	1964—80	0,91	—0,15

Примечание. $J_п$ — приток, $Q_п$ — сток, P — осадки, E — испарение.

Если значение невязки выходит за пределы указанного интервала, считают, что водный баланс рассчитан ненадежно. В этом случае надо тщательно проанализировать погрешности расчета отдельных элементов баланса и при возможности их откорректировать.

5.2. Методика увязки водного баланса

Увязка водного баланса заключается в «разнесении» невязки по отдельным элементам баланса, входящим в расчетное уравнение. Ее производят только в том случае, если полученное значение невязки не выходит за пределы, определенные выражением (5.3). Предварительно по имеющимся рядам среднегодовых или среднемесячных значений элементов водного баланса и невязки с использованием метода множественной линейной регрессии на ЭВМ по стандартной программе рассчитывают среднеквадратические отклонения отдельных элементов и матрицу парных коэффициентов корреляции.

При правильно выполненных расчетах значение сводного коэффициента корреляции $R_м = 1$, коэффициенты уравнения регрессии при приходных компонентах баланса равны 1, при расходных

—1, а свободный член равен 0.* Если коэффициент парной корреляции между невязкой и каким-либо одним элементом баланса оказался значимым ($r \geqslant 0{,}5$), то рекомендуют относить невязку к данному элементу и на этом увязку водного баланса завершать. Далее показано, что такой прием не всегда правомерен. Кроме того, при увязке водных балансов водохранилищ встречались случаи, когда у невязки были обнаружены значимые коэффициенты корреляции с двумя и даже тремя элементами баланса. Очень часто встречаются также случаи, когда коэффициенты парной корреляции незначимы.

Применительно к водохранилищам разработаны приемы увязки водного баланса, которые изложены далее. Они основаны на использовании коэффициентов поправок, которые впервые рекомендованы В. Г. Андреяновым и В. И. Бабкиным для увязки водных балансов речных бассейнов [7]. Суть их предложения заключается в следующем. Ими получено выражение:

$$R^2 = \sum_{i}^{n} \beta_i (\sigma_i/\sigma_\delta) r_{\delta i} = 1, \tag{5.4}$$

где β_i — коэффициенты уравнения регрессии при отдельных элементах баланса; σ_i и σ_δ — среднеквадратические отклонения отдельного (i-го) элемента баланса и невязки; r_{δ_i} — коэффициент парной корреляции между этим элементом и невязкой.

Учитывая, что коэффициенты $\beta_i = \pm 1$ и обозначая $(\sigma_i/\sigma_\delta) r_{\delta_i}$ через b_i, получают следующее окончательное выражение:

$$b_1 - \sum_{i=2}^{n} b_i = 1, \tag{5.5}$$

где b_1 — коэффициент поправки к единственному приходному компоненту в уравнении водного баланса речного водосбора — осадкам, b_i — коэффициенты поправок к расходным элементам баланса.

Умножая невязку водного баланса δ на коэффициент поправки b_i, получают поправку ξ_i к конкретному элементу водного баланса. Откорректированные значения элементов водного баланса определяют по следующим зависимостям:

приходные компоненты

$$x'_i = x_i - \xi_i, \tag{5.6}$$

расходные компоненты

$$x'_j = x_j + \xi_j. \tag{5.7}$$

---

* Установлено, что при коротких выборках (20—25 лет и меньше) значения коэффициентов могут отличаться от приведенных на $\pm(0{,}01...0{,}02)$, что связано с погрешностями осреднения и расчета отдельных параметров по коротким рядам.

Рассмотрена возможность применения изложенной схемы для увязки годовых водных балансов 22 крупнейших водохранилищ СССР. Продолжительность периодов, за которые увязан баланс, для различных водохранилищ колебалась от 11 до 33 лет. Рассмотрены три случая, когда имелась тесная корреляционная связь невязки с одним и двумя или более элементами баланса и когда таких связей не было. Значимые корреляционные связи невязки с осадками были установлены для водохранилищ Кайраккумского ($r = 0{,}612$) и Павловского ($r = 0{,}515$), с испарением — для Днепродзержинского ($r = 0{,}505$) и Рыбинского ($r = -0{,}565$). При расчетах корреляционной матрицы для Кременчугского водохранилища обнаружены большие коэффициенты корреляции невязки с притоком ($r = 0{,}692$) и оттоком ($r = 0{,}616$), а для Киевского водохранилища — с притоком ($r = 0{,}796$), осадками ($r = 0{,}603$) и оттоком ($r = 0{,}726$). Для всех оставшихся 16 водохранилищ тесных корреляционых связей невязки с элементами водного баланса не обнаружено. В соответствии с изложенной схемой Андреянова—Бабкина рассчитаны коэффициенты поправок b_i для всех составляющих водного баланса, включая невязку.

Анализ полученных данных позволил установить, что значения указанных коэффициентов в основном определяются значениями среднеквадратических отклонений элементов баланса и невязки и практически не зависят от коэффициентов парной корреляции между ними. Наибольшие значения коэффициентов b_i получены для притока и оттока, т. е. элементов, характеризующихся наибольшими среднеквадратическими отклонениями. Далее невязки водного баланса умножали на коэффициенты b_i и таким образом определяли поправки к отдельным элементам баланса. Полученные результаты показали, что такую методику «разнесения» невязок применительно к водохранилищам нельзя использовать по следующим основным причинам:

1) в большинстве случаев поправки для притока и оттока получены с одним знаком, т. е. взаимно компенсирующиеся. Абсолютные значения этих поправок нередко достигали 25—30 % значений указанных элементов баланса, что не поддается логическому объяснению;

2) поправки к элементу, характеризующему изменение запасов воды в водохранилище, по абсолютному значению оказались во многих случаях не только сопоставимыми с самим значением элемента, но и превышали его, а иногда приводили к изменению знака. Эти факты также логически не объяснимы;

3) наличие значимых коэффициентов корреляции между невязкой и отдельными элементами баланса практически никак не влияло на значения полученных для них поправок.

В целях устранения указанных недостатков внесены уточнения в представленную схему увязки баланса. При этом принято во внимание, что увязку баланса производят только в том случае, если обеспечена надежность расчета баланса с соблюдением условия (5.3). Это значит, что погрешности определения отдельных

элементов лежат в допустимых пределах и не превышают средних значений случайных погрешностей для них. Предложенные уточнения заключаются в следующем.

1. Когда коэффициенты поправок к значениям притока и оттока имеют одинаковые знаки, определяют разницу между ними. Значение этой разницы принимают в качестве нового поправочного коэффициента, используемого при определении поправки для того элемента баланса, у которого первоначально определенный коэффициент был больше по абсолютному значению.

2. Поправки к элементу, характеризующему изменение запаса воды в водохранилище, вводить не рекомендовано. Коэффициент поправки, полученный для этого элемента или взаимно компенсируют соответствующие коэффициенты, определенные для элементов расходной части баланса, или его прибавляют к тому коэффициенту, который имеет наибольшее абсолютное значение. Вводить поправки в рассматриваемый элемент баланса можно лишь тогда, когда по своему абсолютному значению они находятся в пределах точности определения изменения объема воды в водохранилище.

3. Когда либо приток, либо отток имеет значимую корреляционную связь с невязкой, в него вводят полную поправку, равную значению невязки с противоположным знаком.

Изложенные принципы положены в основу увязки водных балансов по всем упомянутым 22 водохранилищам. Увязанные балансы приведены в п. 5.3. Далее дан пример определения поправочных коэффициентов для Кременчугского водохранилища. В табл. 5.3 приведены основные компоненты годовых водных балансов этого водохранилища, включая невязку за период 1961—1980 гг., а также данные об их среднеквадратических отклонениях и матрица коэффициентов корреляции. На основании этих данных составлена табл. 5.4, в которой приведены значения поправочных коэффициентов b_i, определенные по методике Андреянова—Бабкина. Дальнейшая увязка осуществлена следующим образом. Поскольку значения коэффициентов b_i, полученных для притока и оттока, оказались с одним знаком, по их разности установлено новое значение коэффициента $b_i = 1$, по которому определены поправки к значениям притока. Что касается коэффициентов поправок к осадкам и элементу, характеризующему изменение объема воды в водохранилище, они оказались одинаковыми как по значению, так и по знаку. В связи с тем, что указанные элементы при определении невязки баланса входят в уравнение с противоположными знаками, полученные коэффициенты взаимно компенсируют друг друга, вследствие чего не надо вводить в указанные элементы поправки. Таким образом, при увязке водного баланса введены поправки только в значения притока. Окончательные результаты увязки годовых водных балансов Кременчугского водохранилища приведены в табл. 5.5.

Сравнение матрицы коэффициентов парной корреляции, полученной после введения поправок, с исходной матрицей (см.

Таблица 5.3

Годовой водный баланс Кременчугского водохранилища за 1961—1980 гг. и матрица коэффициентов корреляции его компонентов

Год	Компонент водного баланса, км³					
	$I_п$	P	$Q_п$	E	ΔW	s
1961	37,33	0,64	34,38	1,51	0,15	1,93
1962	55,36	0,85	48,82	1,48	3,57	2,34
1963	40,88	0,74	43,83	1,54	—6,28	2,53
1964	32,47	0,74	27,11	1,51	2,65	1,94
1965	36,41	1,13	31,40	1,75	2,56	1,83
1966	52,77	1,49	51,78	1,74	—1,09	1,83
1967	47,17	0,78	45,76	1,70	—1,13	1,62
1968	40,92	0,94	40,30	1,45	—0,03	0,14
1969	45,39	0,93	44,73	1,44	0,81	—0,66
1970	82,88	1,25	75,64	1,70	1,50	5,29
1971	61,34	1,29	57,84	1,52	—0,66	3,93
1972	34,48	0,74	32,71	1,59	—0,09	1,01
1973	34,11	1,02	35,12	1,66	—0,66	—0,99
1974	43,48	1,00	40,48	1,49	2,08	0,43
1975	43,86	0,59	44,89	1,84	—1,94	—0,34
1976	34,25	1,09	32,74	1,27	0,01	1,32
1977	46,28	1,37	45,60	1,25	—0,94	1,74
1978	50,00	1,14	47,09	1,25	1,54	1,26
1979	54,94	1,01	52,31	1,41	—0,50	2,73
1980	60,09	1,39	57,62	1,07	0,67	2,12
Среднее значение	46,72	1,01	44,51	1,51	0,11	1,60
σ_i	12,23	0,26	11,33	0,20	2,10	1,49

Матрица коэффициентов парной корреляции

№ компонента	1 (s)	2 ($I_п$)	3 (P)	4 ($Q_п$)	5 (E)	6 (ΔW)
1	1,000	0,692	0,340	0,616	—0,034	0,042
2		1,000	0,512	0,980	—0,048	0,117
3			1,000	0,511	—0,331	0,139
4				1,000	—0,046	—0,059
5					1,000	—0,142
6						1,000

Таблица 5.4

Поправочные коэффициенты b_i к компонентам водного баланса Кременчугского водохранилища

Компонент	σ_i	σ_δ	$r_{\delta i}$	b_i
Приток	12,23	1,49	0,69	5,68
Осадки	0,26	1,49	0,34	0,06
Сток	11,33	1,49	0,62	4,68
Испарение	0,20	1,49	—0,03	0,00
Изменение запаса воды в водохранилище	2,10	1,49	0,04	0,06

Таблица 5.5

Увязанный годовой водный баланс Кременчугского водохранилища за 1961—1980 гг.

Год	Компонент водного баланса, км³				
	$I_п$	P	$Q_п$	E	ΔW
1961	35,40	0,64	34,38	1,51	0,15
1962	53,02	0,85	48,82	1,48	3,57
1963	38,35	0,74	43,83	1,54	—6,28
1964	30,53	0,74	27,11	1,51	2,65
1965	34,58	1,13	31,40	1,75	2,56
1966	50,94	1,49	51,78	1,74	—1,09
1967	45,55	0,78	45,76	1,70	—1,13
1968	40,78	0,94	40,30	1,45	—0,03
1969	46,05	0,93	44,73	1,44	0,81
1970	77,59	1,25	75,64	1,70	1,50
1971	57,41	1,29	57,84	1,52	—0,66
1972	33,47	0,74	32,71	1,59	—0,09
1973	35,10	1,02	35,12	1,66	—0,66
1974	43,05	1,00	40,48	1,49	2,08
1975	44,20	0,59	44,89	1,84	—1,94
1976	32,93	1,09	32,74	1,27	0,01
1977	44,54	1,37	45,60	1,25	—0,94
1978	48,74	1,14	47,09	1,25	1,54
1979	52,21	1,01	52,31	1,41	—0,50
1980	57,97	1,39	57,62	1,07	0,67
Среднее значение	45,12	1,01	44,51	1,51	0,11
σ_i	11,25	0,26	11,33	0,20	2,10

Матрица коэффициентов парной корреляции

№ компонента	1 (ΔW)	2 ($I_п$)	3 (P)	4 ($Q_п$)	5 (E)
1	1,000	0,121	0,139	—0,059	—0,142
2		1,000	0,512	0,983	—0,047
3			1,000	0,511	—0,331
4				1,000	—0,046
5					1,000

табл. 5.4) показало, что после увязки баланса теснота корреляционных связей ряда притока с рядами других компонентов баланса изменилась очень незначительно (коэффициенты корреляции различаются не более чем на 0,004).

5.3. Водный баланс крупных водохранилищ СССР. Анализ погрешностей определения основных элементов баланса

К настоящему времени накоплена значительная информация о водных балансах многих водохранилищ СССР. Этому вопросу посвящено достаточно много работ [41, 50, 51, 66 и др.]. Помимо

глубоких научных проработок, посвященных отдельным водохранилищам, уже на протяжении более 30 лет органы Госкомгидромета СССР составляют водные балансы крупных озер и водохранилищ СССР за месяц и год.

Так как водохранилища вступали в строй неодновременно, то и накопленные к настоящему времени воднобалансовые данные имеют различную продолжительность. Последняя наиболее полная сводка о среднем многолетнем водном балансе водохранилищ дана в работе [52], в которой на основании обобщения большого числа литературных источников приведены на уровень 1975 г. сведения о водном балансе 29 крупных водохранилищ СССР. К настоящему времени объем информации о водном балансе водохранилищ значительно возрос. На основании научного анализа и обобщения всех накопленных к настоящему времени материалов о водном балансе крупных водохранилищ СССР получены новые уточненные данные о средних многолетних годовых значениях их основных компонентов, которые приведены в табл. 5.6. Там же приведены значения показателя внешнего водообмена.

Для 30 водохранилищ воднобалансовые соотношения установлены на основании обобщения данных о годовом водном балансе крупных водохранилищ СССР, полученных на озерной сети Госкомгидромета СССР за длительный период наблюдений по 1980 г. включительно. Годовые слои осадков и испарения получены путем суммирования их месячных значений. Предварительно выполнен анализ невязок водных балансов исходя из соотношения (5.3). Установлено, что погрешности расчета годовых водных балансов лежат в допустимых пределах. Произведена увязка годовых балансов по методике, изложенной в предыдущем пункте. Оценены также возможные изменения значений компонентов баланса, помещенных в табл. 5.6, за счет удлинения рядов наблюдений по 1985—1986 гг. включительно. Оказалось, что эти изменения находятся в пределах ± 2 % значения компонента баланса, что свидетельствует о достаточной надежности сведений, помещенных в табл. 5.6 по 30 водохранилищам с длительными рядами наблюдений.

Для девяти водохранилищ компоненты баланса определены по рядам наблюдений продолжительностью 10 лет и менее. В этом случае для анализа привлечены дополнительные материалы научных исследований, а также использованы косвенные приемы проверки полученных данных (карты, гидрометрические материалы и др.). Для остальных 18 водохранилищ, включенных в табл. 5.6, значения компонентов баланса определены косвенными приемами. В большинстве случаев определены сток, осадки и испарение, а приток рассчитан как остаточный член уравнения водного баланса. Как правило, сток определен по данным об измеренных расходах воды в створе подпорного сооружения; осадки — по карте, составленной в ГГИ и опубликованной в работе [27] с учетом результатов исследований Ц. А. Швер [155]; испарение с водной поверхности — по карте (см. п. 3.4.2) с учетом проработок

других авторов [53, 71, 108]. Для Каневского водохранилища в качестве притока принято значение стока из Киевского водохранилища, а для Чебоксарского — норма притока по данным справочника [113], осадки и испарение определены по картам, а сток оценен как остаточный член уравнения водного баланса.

Таблица 5.6 представляет собой наиболе полную сводку данных о водном балансе всех эксплуатируемых в настоящее время водохранилищ СССР объемом более 1 млрд м^3. При подготовке таблицы для большинства водохранилищ оценены погрешности расчета водного баланса и произведена увязка компонентов баланса по предложенной методике. В отличие от сведений, помещенных в работе [52], компоненты баланса, приведенные в этой таблице, рассчитаны по более длительным рядам наблюдений, а для 28 водохранилищ оценены впервые.

При увязке годовых водных балансов, составленных подразделениями Госкомгидромета СССР, и расчете средних многолетних значений основных компонентов баланса определены их среднеквадратические отклонения по формуле (5.1). Последние приведены в табл. 5.7 для 19 крупных водохранилищ СССР с продолжительностью наблюдений от 16 до 33 лет.

Анализ данных о водном балансе за многолетний период показал, что невязки годового водного баланса водохранилищ в первую очередь связаны с погрешностями определения двух основных его компонентов — поверхностного притока и стока. По абсолютному значению среднеквадратические отклонения определения средних многолетних значений обоих компонентов в большинстве случаев больше значений невязок годового баланса. Погрешности оценки средних многолетних значений осадков и испарения существенно меньше и не превышают 10 % значений погрешностей определения притока и стока даже в водохранилищах с минимальным удельным водосбором, в водном балансе которых доля осадков и испарения наибольшая. Из-за малой доли осадков и испарения в водном балансе крупных водохранилищ погрешности их определения практически не оказывают влияния на значение невязки баланса.

Погрешности определения указанных компонентов баланса по отношению к их абсолютным значениям составляют в подавляющем большинстве случаев 2—8 %. Для отдельных водохранилищ они могут превышать указанный предел. Так, относительные погрешности определения притока, осадков и стока для Ириклинского водохранилища составили соответственно 15, 14,3 и 16,2 % при абсолютных значениях этих компонентов 1,48, 0,007 и 1,17 км^3. Относительная погрешность определения осадков для Кайраккумского водохранилища составила 16,7 % при абсолютном значении этого компонента 0,06 км^3.

Среднеквадратическое отклонение определения среднего многолетнего годового изменения запаса воды в водохранилищах существенно различно. Наибольшие погрешности определения среднего многолетнего значения этого компонента, сопоставимые

Таблица 5.6

Средний многолетний годовой водный баланс крупнейших эксплуатируемых водохранилищ СССР полным объемом более 1 млрд м^3

Водохранилище	Приход			Расход			Внешний водообмен, км^3	Расчетный период
	поверхностный приток, км^3/год	осадки		сток, км^3	испарение			
		км^3	мм		км^3	мм		
Андижанское *	3,82	0,03	650	3,80	0,05	1000	3,85	—
Араксинское *	5,78	0,07	550	5,72	0,13	1000	5,85	—
Братское	91,30	1,62	325	90,98	1,94	390	92,92	1962—80
Бухтарминское	19,71	1,10	265	17,16	3,65	880	20,81	1972—80
Верхнетуломское	5,88	0,42	580	6,13	0,17	235	6,54	1965—80
Вилюйское	18,13	0,60	302	17,95	0,78	392	18,73	1974—80
Волгоградское	237,16	1,16	384	236,05	2,27	751	238,32	1959—80
Воткинское	53,66	0,58	580	53,77	0,47	470	54,24	1966—80
Выгозерско-Ондское	6,26	0,75	598	6,57	0,44	350	7,01	1957—80
Горьковское	46,62	1,01	658	46,76	0,87	566	47,63	1957—80
Днепровское	47,48	0,17	462	47,36	0,29	788	47,65	1957—80
Днепродзержинское	48,87	0,26	485	48,73	0,40	746	49,13	1965—80
Днестровское *	8,10	0,09	700	8,10	0,09	700	8,19	—
Зейское *	23,04	1,20	550	23,37	0,87	400	24,24	—
Иваньковское	9,20	0,19	613	9,23	0,16	516	9,39	1952—80
Имандровское	5,31	0,57	650	5,61	0,27	310	5,88	1981—87
Иовское *	7,01	0,18	612	7,10	0,09	300	7,19	—
Ириклинское	1,38	0,07	302	1,25	0,20	862	1,45	1963—80
Иркутское	62,30	12,20	377	61,30	13,20	408	74,50	1962—80
Кайраккумское	15,53	0,06	172	15,16	0,43	1230	15,59	1957—80
Камское	52,78	0,93	628	52,95	0,76	513	53,71	1956—80
Каневское **	34,29	0,29	560	34,22	0,36	690	34,58	—
Капчагайское ***	15,20	0,33	330	11,80	1,10	1100		1972—80
Каховское	47,90	0,95	447	47,13	1,72	809	48,85	1956—80

Киевское	34,37	0,50	583	34,29	0,58	676	34,87	1967—80
Княжегубское *	8,48	0,37	600	8,67	0,18	300	8,85	—
Костешты-Стынка *	2,44	0,04	600	2,43	0,05	800	2,48	—
Краснодарское *	13,56	0,28	700	13,58	0,34	850	13,84	—
Красноярское	87,02	0,69	345	86,47	1,24	620	87,71	1967—80
Кременчугское	45,12	1,01	490	44,62	1,51	733	46,13	1961—80
Кубенское *	4,40	0,49	750	4,63	0,26	400	4,89	—
Куйбышевское	235,72	2,72	507	234,86	3,58	668	238,44	1957—80
Кумское *	3,63	1,18	620	4,20	0,61	320	4,81	—
Курейское *	19,22	0,45	800	19,50	0,17	300	19,67	—
Мингечаурское	11,96	0,18	337	11,58	0,56	1049	12,14	1958—80
Нижнекамское	87,74	0,62	458	87,66	0,70	514	88,36	1980—89
Новосибирское	55,21	0,35	359	54,97	0,59	606	55,56	1960—80
Нурекское	18,97	0,06	682	18,96	0,07	795	19,03	1978—86
Павловское	10,14	0,07	649	10,15	0,06	557	10,21	1961—80
Пиренгское *	1,47	0,12	550	1,52	0,07	300	1,59	—
Пролетарское *	0,34	0,43	600	0,15	0,62	870	0,77	—
Рыбинское	30,07	2,13	578	30,11	2,09	567	32,20	1948—80
Саратовское	230,98	0,79	420	230,57	1,20	640	231,77	1969—80
Саяно-Шушенское *	46,70	0,31	500	46,70	0,31	500	47,01	—
Сегозерское	2,18	0,45	570	2,33	0,30	380	2,63	1958—80
Серебрянское	3,11	0,13	550	3,19	0,05	210	3,24	1970—80
Токтогульское *	11,59	0,09	350	11,36	0,32	1250	11,68	—
Тюямуюнское	32,76	0,05	100	32,30	0,51	1100	32,81	1983—88
Угличское	10,95	0,14	617	10,96	0,13	573	11,09	1952—80
Усть-Илимское	100,44	0,76	417	100,60	0,60	329	101,20	1977—80
Хантайское *	16,11	2,12	1000	17,70	0,53	250	18,23	—
Цимлянское	18,79	1,09	484	17,57	2,31	1025	19,88	1953—80
Чарвакское	5,97	0,02	600	5,96	0,03	830	5,99	1979—87
Чардаринское	13,92	0,18	298	13,50	0,60	993	14,10	1967—80
Чебоксарское **	109,50	1,18	600	109,50	1,18	600	110,68	—
Шекснинское	4,56	0,93	571	4,79	0,70	430	5,49	1964—80
Юшкозерское	3,12	0,21	452	3,18	0,15	327	3,33	1957—80

Примечание. „*" — определение стока по измеренным данным, осадков и испарения — по картам, притока — как остаточного члена уравнения баланса; „**" — определение притока по данным о норме стока впадающих рек (с оценкой стока с неизученной площади бассейна, осадков и испарения по картам), стока — как остаточного члена уравнения баланса; „***" — водохранилище находится в стадии наполнения.

Таблица 5.7

Среднеквадратические погрешности определения средних многолетних значений компонентов годового водного баланса $\sigma_{\bar{i}}$ и их процентные соотношения

Водохранилище	$\sigma_{\bar{I}_п}$		$\sigma_{\bar{P}}$		$\sigma_{\bar{Q}}$		$\sigma_{\bar{E}}$		$\sigma\Delta W$	Удельный водосбор
	км³	%	км³	%	км³	%	км³	%	км³	
Братское	2,34	2,6	0,09	5,6	2,92	3,4	0,13	6,7	3,21	128
Верхнетуломское	0,28	4,6	0,02	4,8	0,22	3,6	0,01	5,9	0,21	23
Воткинское	2,89	5,2	0,03	5 2	2,97	5,5	0,02	4,3	0,28	116
Днепровское	2,85	5,8	0,01	5,3	2,74	5,8	0,01	3,3	0,03	1120
Днепродзержинское	3,!5	6,4	0,02	7,1	3,22	6,7	0,02	5,4	0,05	741
Иваньковское	0,47	5,0	0,01	5,3	0,45	4,9	0,01	5,9	0,05	124
Ириклинское	0,21	15	0,01	14,3	0,19	16,2	0,01	4,8	0,09	142
Кайраккумское	1,16	6,9	0,01	16,7	1,06	7,0	0,03	6,7	0,18	277
Камское	1,77	3,2	0,03	3,2	1,77	3,4	0,02	2,6	0,49	76
Красноярское	2,79	3,2	0,04	6,2	2,72	3,4	0,07	5,0	2,72	144
Кременчугское	2,73	5,8	0,06	5,9	2,53	5,7	0,04	2,6	0,47	168
Куйбышевское	8,28	3,4	0,10	3,7	7,94	3,4	0,08	2,2	1,87	201
Мингечаурское	0,53	4,4	0,01	5,3	0,48	4,2	0,03	5,4	0,40	103
Новосибирское	2,37	4,3	0,01	2,7	2,42	4,5	0,02	3,4	0,26	216
Павловское	0,49	4,7	0,01	14,3	0,48	4,8	0,01	16,7	0,02	400
Рыбинское	1,52	4,9	0,07	3,3	1,51	5,0	0,07	3,3	0,75	32
Угличское	0,6	5,6	0,01	7,1	0,62	5,8	0,01	7,1	0,03	237
Цимлянское	1,23	6,6	0,06	5,6	0,94	5,5	0,07	3,0	0,57	82
Шекснинское	0,35	7,2	0,03	3,2	0,36	7,8	0,03	4,4	0,14	11

Примечание. Относительные значения погрешностей определения изменений запаса воды в водохранилище не рассчитаны, так как ряды этого компонента баланса содержат как положительные, так и отрицательные члены и с возрастанием длины ряда данный компонент стремится к нулю.

с погрешностью оценки среднего многолетнего притока и стока характерны для крупнейших равнинных водохранилищ озерного типа речных водохранилищ сложной конфигурации и крупных предгорных водохранилищ, которые имеют обширные площади водной поверхности, большую протяженность и значительный рассредоточенный приток. К таким водохранилищам относятся Братское, Верхнетуломское, Красноярское, Мингечаурское, Рыбинское, Цимлянское. В силу указанных особенностей для этих водохранилищ менее надежно определены средние уровни и соответственно изменения запасов воды в них. Для водохранилищ меньших размеров, более простой формы и с небольшой боковой приточностью погрешности определения рассматриваемого элемента баланса существенно меньше и не превышают 10 % погрешностей притока или стока (водохранилища Днепровское, Днепродзержинское, Павловское, Угличское и Воткинское). Очевидно, что для таких водохранилищ изменения запасов воды в их чаше оценены более надежно.

Таким образом, погрешности расчета водного баланса крупных водохранилищ СССР в первую очередь связаны с погрешностями оценки поверхностного притока и стока, а для некоторых водохранилищ — и с погрешностями определения изменений запасов воды в них. Поэтому для повышения надежности расчетов водного

баланса крупных водохранилищ в первую очередь необходимо далее совершенствовать методики расчета боковой приточности, методы учета стока на ГЭС и других гидротехнических сооружениях (шлюзы, водосбросы и т. д.) и приемы определения запаса воды в водохранилище. Коренное решение этого вопроса возможно лишь путем существенного повышения плотности гидрологической сети на крупных водохранилищах при условии регулярного определения их изменяющихся морфометрических характеристик.

5.4. Взаимосвязь элементов водного баланса водохранилищ

Главную роль в водном балансе водохранилищ играют поверхностный приток и сток через подпорное сооружение. Два других элемента уравненного баланса — осадки и испарение, имеют подчиненное значение. При этом для речных водохранилищ их доля по отношению к уравненному водному балансу составляет 2—3 %, не более. Доля этих элементов в приходной (расходной) частях водного баланса озерных водохранилищ значительно бо́льшая и достигает 15—20 %, а в некоторых случаях и выше (для Кумского водохранилища, например, осадки по отношению к притоку составляют 32 %). От климатической зоны, в которой расположено водохранилище, зависит соотношение между притоком и стоком. В зоне избыточного увлажнения, где осадки превышают испарение, сток больше притока, а в зоне недостаточного увлажнения имеет место обратная картина.

При расчетах водных балансов за год и месяц помимо четырех указанных компонентов определяют также изменения запасов воды в чаше водохранилища. Для крупных водохранилищ значения этого компонента могут быть весьма существенными (табл. 5.8). Характер изменений данного элемента зависит от режима регулирования стока подпорным сооружением и гидрометеорологических условий в районе водохранилища. Изменения запаса воды в водохранилищах вызывают изменения их располагаемых водных ресурсов, т. е. того количества воды, которое может быть использовано для народнохозяйственных нужд.

Что касается подземного водообмена, то по имеющимся сравнительно немногочисленным данным, доля этой составляющей в водном балансе колеблется в различные фазы режима подземных вод от 1 до 5 %. Об этом свидетельствуют данные табл. 5.9, составленной по литературным источникам. Полученные на основании разработанной методики данные о затратах воды на насыщение берегов и ложа 21 крупного водохранилища (см. п. 9.1) подтверждают приведенную оценку.

Соотношения основных составляющих водного баланса водохранилищ характеризуют его структуру. Выраженные в аналитической форме, эти соотношения представляют собой уравнения взаимосвязи элементов баланса. Структура водного баланса водохранилищ прежде всего отражает особенности водообмена

где $K_п$ — в процентах, P — осадки, I — суммарный приток к водоему.

После ряда преобразований он получил следующую формулу для оценки коэффициента $K_п$:

$$K_п = [1/(\eta\varphi + 1)]\,100, \tag{5.9}$$

где η — коэффициент стока с водосбора; φ — показатель удельного водосбора, $K_п$ — в процентах.

Показатель структуры расходной части водного баланса зонального водоема ($K_р$) Эдельштейн предложил определять по зависимости

$$K_р = [E/(Q + E)]\,100, \tag{5.10}$$

где $K_р$ — в процентах, E — испарение, Q — сток из водоема.

Данная формула приведена к виду

$$K_р = [\varepsilon/(\eta\varphi + 1)]\,100, \tag{5.11}$$

где $\varepsilon = E/P$ — показатель испарения.

Используя зависимости (5.9) и (5.11), а также средние зональные значения η и ε, Эдельштейн в обобщенном виде представил номограмму структуры водного баланса зональных водоемов суши, включая водохранилища. Располагая данными о показателе удельного водосбора φ и типе ландшафта, окружающего водохранилище, по номограмме можно определить структурные показатели водного баланса.

В работе Т. П. Гронской, В. А. Знаменского и Н. Н. Москвиной [75] также рассмотрены некоторые закономерности зонального распределения составляющих водного баланса водоемов мира. Однако предложенные ими основные графические зависимости, характеризующие взаимосвязь элементов баланса водоемов с показателем их удельного водосбора для водохранилищ мало приемлемы. Авторы рассматривали соотношения между $K_п$, средним слоем стока с водосбора и коэффициентом φ. Графики построены для значений $K_п = 0{,}2...1{,}0$, но для водохранилищ доля осадков в водном балансе в большинстве случаев не превышает 20 %, т. е. $K_п < 0{,}2$.

Рассмотрена взаимосвязь между осадками, выпадающими на поверхность водохранилища, и притоком к нему. Если выразить слой осадков на водную поверхность в виде $x_в = P/f$, где P — объем выпавших осадков; а слой осадков на поверхность бассейна — в виде $x_б = I/(F\eta)$, где I — объем притока к водохранилищу, то для зональных водохранилищ, для которых соблюдается условие $x_в = x_б$, можно записать соотношение

$$P/I = 1/(\eta\varphi). \tag{5.12}$$

Таким образом, доля осадков в общем объеме поверхностного притока зависит от соотношения площадей водохранилища и его

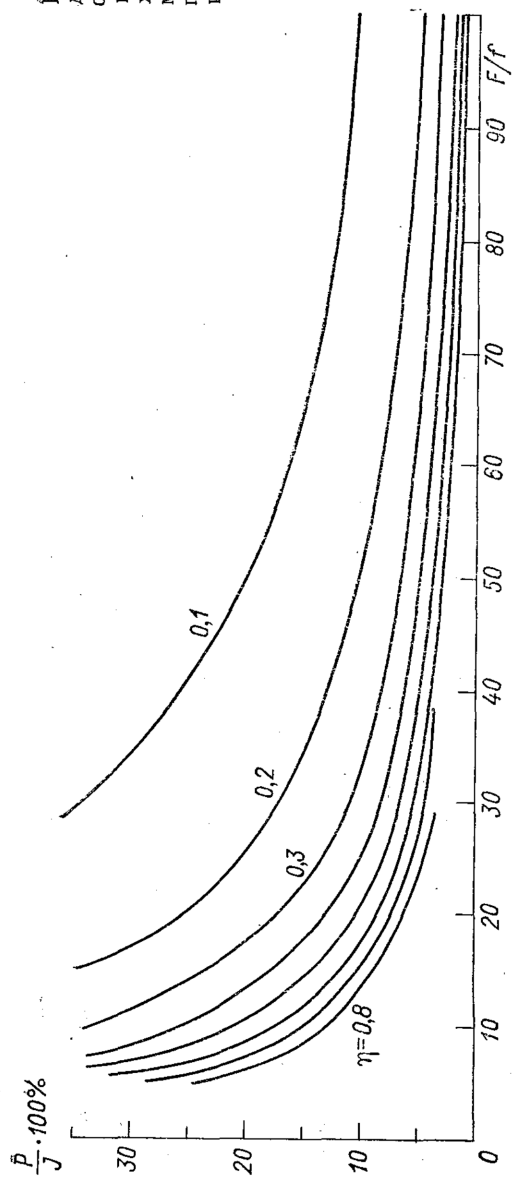


Рис. 5.1. Номограмма для определения доли осадков в поверхностном притоке к водохранилищу в зависимости от соотношения площадей водосбора и водохранилища и коэффициента стока.

водосбора с учетом увлажненности бассейна, характеризуемой коэффициентом стока.

При каскадном расположении водохранилищ с примерно одинаковыми площадями водной поверхности доля осадков в суммарном притоке к нижележащим водохранилищам будет снижаться вследствие увеличения знаменателя в правой части соотношения (5.12). Так, например, для Шекснинского водохранилища (Волжско-Камский каскад) данный показатель составляет 0,19, а для нижерасположенного Саратовского водохранилища с примерно такой же площадью водной поверхности он равен 0,01 (табл. 5.10).

Выявленная закономерность (рис. 5.1) позволяет оценивать соотношения между осадками и притоком к водохранилищу на основании сведений о показателе удельного водосбора и коэффициенте стока. По существу, данная номограмма восполняет пробел, упомянутый при рассмотрении работы [75]. Она в несколько измененном виде характеризует взаимосвязь осадков и поверхностного притока в водохранилище в наиболее характерной зоне их соотношений $0 < P/I \leqslant 0{,}3$. Легко убедиться в том, что после некоторых преобразований выражение (5.12) можно привести к виду (5.9).

К. К. Эдельштейн отдельно рассмотрел структуру приходной и расходной

Таблица 5.10

Соотношение осадков и поверхностного притока для крупных водохранилищ СССР

Водохранилище	Площадь поверхности f км²	Площадь водосбора F	Расчетный период	Поверхностный приток $I_п$ км³/год	Осадки на поверхность P км³/год	$\frac{P}{I_п}$ 100 %	η	$\frac{f}{F\eta}$
Иваньковское	327	40,7	1952—80	9,20	0,19	2,1	0,44	0,02
Угличское	249	59,4	1952—80	10,95	0,14	1,3	0,35	0,01
Шекснинское	1 670	17,8	1964—80	4,56	0,93	20,4	0,50	0,19
Рыбинское	4 550	143,2	1948—80	30,07	2,13	7,1	0,40	0,08
Горьковское	1 591	220,6	1957—80	46,62	1,01	2,2	0,30	0,02
Павловское	116	47,1	1961—80	10,14	0,07	0,7	0,33	0,01
Камское	1 915	166,1	1956—80	52,78	0,93	1,8	0,57	0,02
Воткинское	1 120	180,0	1966—80	53,66	0,58	1,1	0,66	0,01
Камский каскад	5 615	364,4		90,5	3,01	3,3	0,66	0,02
Куйбышевское	6 448	1 187,3	1957—80	235,72	2,72	1,1	0,40	0,01
Саратовское	1 831	1 265,5	1969—80	230,98	0,79	0,3	0,37	0,01
Волгоградское	3 117	1 332,4	1959—80	237,16	1,16	0,5	0,36	0,01
Волжско-Камский каскад	24 966	1 332,4		246,7	13,08	5,3	0,36	0,05
Киевское	922	239,0	1967—80	34,37	0,50	1,5	0,18	0,02
Кременчугское	2 252	389,7	1961—80	45,12	1,01	2,2	0,18	0,03
Днепродзержинское	567	431,2	1965—80	48,87	0,26	0,5	0,18	0,01

Днепровское	410	470,1	1957—80	47,48	0,17	0,4	0,18	0,01
Каховское	2 155	482,0	1956—80	47,90	0,95	2,0	0,18	0,02
Днепровский каскад	6 888	482,0		47,90	3,15	6,6	0,18	0,08
Иркутское (оз. Байкал)	32 966	541,8	1962—80	62,30	12,20	19,6	0,30	0,20
Братское	5 478	699,3	1962—83	91,30	1,62	1,8	0,43	0,02
Усть-Илимское	1 922	746,4	1977—80	100,44	0,76	0,8	0,34	0,01
Ангарский каскад	40 366	746,4		100,44	14,58	14,5	0,34	0,16
Бухтарминское	5 490	136,2	1972—80	19,71	1,10	5,6	0,50	0,07
Верхнетуломское	745	16,8	1965—80	5,88	0,42	7,1	0,58	0,07
Вилюйское	2 176	136,0	1974—80	18,13	0,60	3,3	0,36	0,04
Выгозерско-Ондское	1 250	18,0	1957—80	6,26	0,75	12,0	0,53	0,12
Ириклинское	260	36,6	1963—80	1,38	0,07	5,1	0,13	0,05
Кайраккумское	513	133,2	1957—80	15,53	0,06	0,4	0,4	0,01
Красноярское	2 000	287,0	1967—80	87,02	0,69	0,8	0,82	0,01
Мингечаурское	605	57,6	1958—80	11,96	0,18	1,5	0,40	0,02
Новосибирское	1 070	230,9	1960—80	55,21	0,35	0,6	0,58	0,01
Сегозерское	815	6,7	1958—80	2,18	0,45	20,6	0,63	0,19
Серебрянское	236	9,5	1970—80	3,11	0,13	4,2	0,58	0,04
Цимлянское	2 702	222,0	1953—80	18,79	1,09	5,8	0,21	0,06
Юшкозерское	465	9,9	1957—80	3,12	0,21	6,7	0,60	0,08

Примечания: 1. Площадь водосбора водохранилищ принята по данным Справочника [113], а для водохранилищ, не вошедших в эту работу, по Справочнику водохранилищ СССР, ч. 1, водохранилища объемом 10 млн. м³ и более (Москва: Изд. Союзводпроекта, 1988 г. — 322 с.). 2. Данные о среднегодовых притоке и осадках заимствованы из табл. 5.6,

частей водного баланса водоема и ввел показатели $K_п$ и $K_р$. Несмотря на определенные преимущества, такой подход не лишен недостатков. Прежде всего, отдельное рассмотрение структуры приходной и расходной частей водного баланса не позволяет однозначно охарактеризовать соотношение между всеми основными элементами баланса водоема. Два водоема, имеющие одинаковые показатели структуры приходной части баланса, могут различаться по показателям расходной части и наоборот. Основной причиной такого положения является то, что зональные изменения

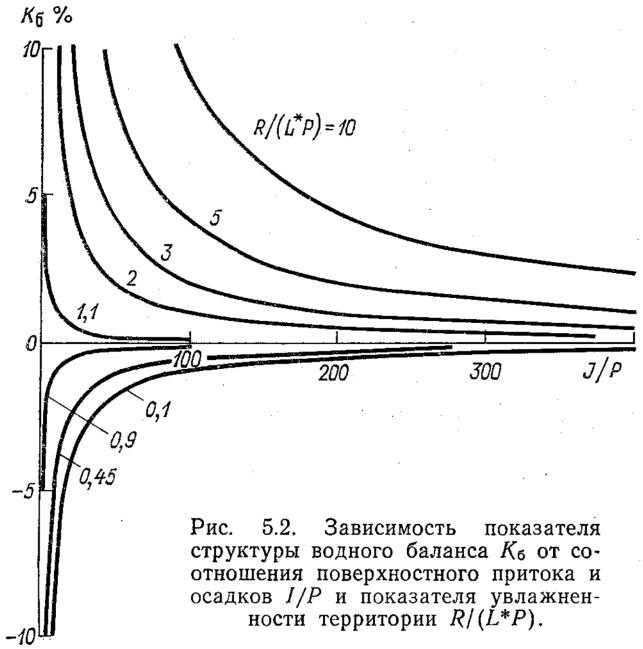


Рис. 5.2. Зависимость показателя структуры водного баланса $K_б$ от соотношения поверхностного притока и осадков I/P и показателя увлажненности территории $R/(L^*P)$.

осадков связаны в основном с увлажненностью территории (которую правомерно характеризует коэффициент стока). В то же время изменения испарения с водной поверхности обусловлены, в первую очередь, тепловыми ресурсами. А они в приведенных структурных схемах не учтены. Предпринята попытка вывести общее выражение, характеризующее взаимосвязь всех основных элементов водного баланса водоема:

$$K_б = (E - P)/(I + P). \qquad (5.13)$$

Значения коэффициента $K_б$ будут, с одной стороны, указывать на характер соотношения между осадками и испарением (знак плюс будет свидетельствовать о превышении осадков над испарением и наоборот), а с другой — характеризовать долю «видимого» испарения в водном балансе. Выражение (5.13) можно преобразовать к виду

$$K_б = (E/P - 1)/(\eta\varphi + 1). \qquad (5.14)$$

Приравняв испарение с водной поверхности к испаряемости, можно представить этот элемент баланса, согласно М. И. Будыко [39], как $E = R/L^*$, где R — радиационный баланс увлажненной поверхности, $L^* = 2{,}50$ кДж/г — удельная теплота испарения. С учетом зависимости (5.12) выражение (5.14) примет вид

$$K_б = [R/(L^*P) - 1]/(I/P + 1). \qquad (5.15)$$

Соотношение $R/(L^*P)$ называют радиационным индексом сухости, характеризующим увлажненность территории. Исходя из формулы (5.15) построена номограмма (рис. 5.2), позволяющая определять коэффициент $K_б$ в зависимости от соотношения поверхностного притока и осадков и от увлажненности территории (при $R/(L^*P) < 0{,}45$ — избыточно влажная, $0{,}45 < R/(L^*P) < 1{,}0$ — влажная, $1 < R/(L^*P) < 3$ — недостаточно влажная, $R/(L^*P) > 3$ — сухая). Для пользования номограммой необходимо определить зону, к которой относится водоем, и средние многолетние объемы осадков на поверхность водохранилища и притока к нему. Получить такие данные на стадии проектирования водохранилищ нетрудно (для более надежных расчетов следует определять соотношение $R/(L^*P)$, используя карту из работы [125]).

Коэффициент $K_б$, определенный по номограмме, позволяет установить знак разности $P - E$ и долю «видимого» испарения в водном балансе. Положительные результаты, полученные при проверке номограммы на независимом материале (на примере 57 крупных водохранилищ СССР) позволяют рекомендовать ее для оценки структуры водного баланса водохранилищ СССР.

ЧАСТЬ III. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ВОДОХРАНИЛИЩ СССР

ГЛАВА 6. ПОНЯТИЕ О ВОДНЫХ РЕСУРСАХ ВОДОХРАНИЛИЩ. РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ПРИТОКА В ИХ ФОРМИРОВАНИИ

6.1. Общая трактовка понятия «водные ресурсы»

Объем воды, содержащейся в любом водном объекте или в пределах любой территории, можно рассматривать двояко: как определенный ресурс влаги, с точки зрения возможности его использования в народнохозяйственных целях, или как определенный водный запас (при оценке доли участия данного вида природной субстанции в общем круговороте воды на Земле). Большая Советская Энциклопедия трактует водные ресурсы как «пригодные для использования во́ды». В этом смысле практически все воды гидросферы — воды рек, озер, каналов, водохранилищ, морей и океанов, подземные воды, воды ледников и т. д. являются водными ресурсами в широкой трактовке этого понятия.

Именно так понятие «водные ресурсы» трактует М. Ф. Срибный. Под водными ресурсами он понимает не только воду как вещество, но и водные объекты — реки, подземные воды, ледники, озера, моря, океаны, а также искусственные водоемы и каналы [139]. Водные ресурсы — один из видов природных, или естественных, ресурсов. Понятие «естественные (природные) ресурсы» широко используют как в общей, так и специальной, в том числе географической, литературе. По мнению многих советских географов, термин «природные ресурсы» выражает непосредственную связь природы с хозяйственной деятельностью человека. В географической литературе содержание этого понятия дано наиболее определенно. Так, Д. Л. Арманд в Краткой географической энциклопедии под природными ресурсами понимает «элементы природы, используемые в хозяйстве, являющиеся средствами существования человеческого общества: почвенный покров, полезные дикие растения, животные, полезные ископаемые, вода (для водоснабжения, орошения, промышленности, энергетики, транспорта), благоприятные климатические условия (главным образом тепло и влага осадков), энергия ветра». Близкое к этому, но более лаконичное определение дано в работе [9]. Ее авторы считают, что «природные тела и виды энергии, используемые человеком, называются ресурсами». Подобные же трактовки данного понятия можно найти в работах Б. Г. Саушкина [135], А. М. Колотиевского [95], Ю. К. Ефремова в Экономической энциклопедии, в работах И. В. Комара [96], а также зарубежных ученых E. A. Ackerman [168], A. Spoehr [188].

С точки зрения автора, наиболее удачное определение естественных ресурсов дал А. А. Минц. Он определил их как «тела или силы природы, которые на данном уровне развития производитель-

ных сил и изученности могут быть использованы для удовлетворения потребностей человеческого общества в форме непосредственного участия в материальной деятельности» [112]. Это так называемые реальные ресурсы. Кроме них выделена также категория потенциальных естественных ресурсов, которые нужны для производства, но по каким-либо причинам (например, вследствие недостаточной технической оснащенности) не могут быть вовлечены в него [20]. К потенциальным относятся также еще не выявленные (это прежде всего относится к полезным ископаемым) естественные ресурсы.

По мере развития общества возрастает объем потребления естественных ресурсов и степень их общественной значимости. Большое значение при этом имеет уровень технологических возможностей их использования. Потенциальные ресурсы при этом постепенно переходят в категорию реальных.

Надо обратить внимание на понятие «водные ресурсы». Если исходить из общей трактовки этого понятия, то водные запасы только в том случае становятся ресурсами, если при данном уровне развития производительных сил их можно использовать в интересах народного хозяйства. В противном случае эти запасы будут представлять собой потенциальные водные ресурсы. Реальные и потенциальные водные ресурсы в сумме составляют общие водные ресурсы. В международном словаре под водными ресурсами понимают «запасы воды на площади или в данном объеме, выраженные в виде количества доступных для использования поверхностных и подземных вод» [172]. Данное определение, как можно легко убедиться, вытекает из понятия «естественные ресурсы». Таким образом, для того чтобы определить реальные водные ресурсы, необходимо выявить те запасы воды, которые на данной стадии развития производительных сил могут быть использованы обществом. Следовательно, необходимо прежде всего определить, что понимают под «использованием» водных ресурсов. В отличие от других природных ресурсов, воду, за редкими исключениями, не используют непосредственно для создания продукции с преобразованием в другое вещество и безвозвратным изъятием из природного круговорота [112]. При использовании водные ресурсы либо вообще количественно не меняются (например, при их использовании в гидроэнергетике, водном транспорте, рыбном хозяйстве, в рекреационных целях и др.), либо часть их изымают из водоисточника (для орошения, промышленного и коммунального водопотребления, наполнения наливных водохранилищ и др.). Эта часть составляет безвозвратные потери для данного водоисточника. Но при этом общие запасы воды на Земле не изменяются. Если исходить из такой трактовки понятия «использование» источников воды, то к категории водных ресурсов следует отнести, в первую очередь, запасы воды в реках, озерах, водохранилищах и морях, которые могут быть использованы уже при современном уровне развития производительных сил. К реальным водным ресурсам также необходимо отнести часть запасов подземных вод и

запасов воды в ледниках, которую можно использовать в хозяйственной деятельности. Многолетние запасы воды в ледниках, воды глубоких подземных горизонтов, запасы воды в подземных льдах, которые в настоящее время по ряду причин не могут быть вовлечены в хозяйственную деятельность, на данном этапе развития производительных сил относятся к потенциальным водным ресурсам.

Надо принять во внимание, что общие запасы воды на Земле складываются из стационарных запасов, сосредоточенных в различных частях гидросферы, и из запасов, непрерывно возобновляющихся в процессе круговорота воды. Последние относят к категории динамических запасов. Динамические запасы часто отождествляют с естественными водными ресурсами тех или иных категорий вод. В частности, под естественными ресурсами подземных вод в гидрогеологии часто понимают их динамические запасы [154]. В гидрологии динамические запасы воды в руслах рек также отождествляют с понятием естественных водных ресурсов, т. е. с объемом ежегодно возобновляемого речного стока. Надо заметить, что в обоих случаях речь идет о ежегодно возобновляющихся объемах воды, которые в качестве водных ресурсов рассматривают применительно к конкретным водным объектам.

Действительно, понятие «водные ресурсы» в первую очередь надо рассматривать по отношению к водным объектам, являющимся их источником, а уже потом можно вести речь о водных ресурсах различных территорий, государств, природных регионов и т. д. В отношении стационарных запасов воды имеет место именно такой подход. Медленно возобновляемые водные ресурсы рассматривают применительно к ледникам, подземным водам, морям, озерам и т. д. Такой же подход правомерно распространить и на динамические запасы воды, которые формируют ежегодно возобновляемые водные ресурсы.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что термин «водные ресурсы» нередко отождествляют с динамическими запасами воды. Такая трактовка данного термина, с точки зрения автора, неправомерна.

А. И. Чеботарев в Гидрологическом словаре пишет, что имея в виду относительно небольшой объем используемой подземной и заключенной в озерах воды, под водными ресурсами крупных территорий и государств понимают лишь годовой сток рек [154]. Но, во-первых, степень использования воды в народном хозяйстве не имеет отношения к понятию «водные ресурсы», и, во-вторых, при таком толковании медленно возобновляющиеся запасы воды, сосредоточенные в ледниках, глубоких подземных горизонтах и подземных льдах, объем которых в большинстве случаев намного больше объема годового речного стока с территории, нельзя рассматривать в качестве потенциальных водных ресурсов, что логически трудно объяснить.

Чтобы избежать разночтений, термину «водные ресурсы» надо дать однозначное определение. Оно может быть следующим: под

водными ресурсами любого водного объекта или территории понимают средний за определенный интервал времени объем воды в водном объекте или в пределах рассматриваемой территории, который можно использовать при данном уровне развития производительных сил. Такое определение не противоречит существующим толкованиям этого понятия в Большой Советской Энциклопедии и в работе [65]. В то же время оно четко устанавливает, что водные ресурсы можно рассматривать только применительно к водным объектам или территориям, но не к видам вод в зависимости от их происхождения. Неправомерно говорить о ресурсах речного стока, атмосферной и почвенной влаги и т. д., ведь при круговороте воды на Земле одни виды вод переходят в другие. Особенно это касается динамических запасов. Так, влага, образовавшаяся в атмосфере, выпадая в виде осадков на поверхность суши, формирует речной сток, пополняет запасы почвенной влаги и подземных вод и т. д. Поэтому можно говорить о водных ресурсах рек, ресурсах подземных вод (как водного объекта), водных ресурсах ледников и т. д.

Второй особенностью предлагаемого определения «водных ресурсов» является его «привязка» к временно́му масштабу. Надо заметить, что в настоящее время термин «водные ресурсы» употребляют применительно к средним многолетним объемам воды, будь их источником стационарные или динамические запасы или обе эти категории вместе. Такая исторически сложившаяся временна́я трактовка термина весьма обоснованна, так как позволяет получить общее представление об объемах воды, сосредоточенных в различных водных объектах на поверхности Земли и в ее толще, а также о средних запасах воды в пределах отдельных территорий и регионов. При таком временно́м масштабе количественные оценки водных ресурсов выполняют для некоторых осредненных условий их формирования и за достаточно длительный промежуток времени. Этого достигают либо путем непосредственного определения среднего значения годовых объемов воды за многолетний период, как это делают, например, при оценке водных ресурсов рек, либо путем использования некоторых косвенных осредненных характеристик, например, значения среднего многолетнего уровня воды при оценке водных ресурсов естественных водоемов. Но рассматривать понятие «водные ресурсы» только применительно к среднему многолетнему периоду нет достаточных оснований. Да и существующая практика использования этого термина трактует его значительно шире. Часто в литературе приводят данные о водных ресурсах рек, ресурсах подземных вод за отдельные годы и периоды. Так, в издающемся с 1982 г. ежегодном междуведомственном кадастровом издании «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их качество и использование» приведены разнообразные сведения о водных ресурсах рек и ресурсах подземных вод за конкретные годы.

Следует подчеркнуть еще одно важное обстоятельство. Говорить об использовании водных ресурсов, ограничиваясь их

рассмотрением только в среднем многолетнем разрезе, значит необоснованно сужать это понятие. Такой подход, правда, используют при оценках снижения водных ресурсов бессточных водоемов под влиянием хозяйственной деятельности. Однако в большинстве случаев о масштабах использования вод судят по отношению к объему водных ресурсов, определенному за конкретный интервал времени. Поэтому нет противоречия в том, что водные ресурсы можно определять как в среднем за многолетие, так и за конкретные периоды (год, сезон, месяц, декаду и т. д.). Средний многолетний объем водных ресурсов водных объектов или территорий есть не что иное, как их «норма», если применить гидрологическую терминологию. В этом случае можно говорить о норме водных ресурсов рек, ресурсов подземных вод, водных ресурсов водоемов или о норме водных ресурсов отдельных территорий, континентов и суши в целом. Надо подчеркнуть, что при таком толковании понятия «норма водных ресурсов речного бассейна» и «норма водных ресурсов реки» неравнозначны. Первое понятие более широкое, так как под нормой водных ресурсов речного бассейна понимают суммарный средний многолетний объем всех видов вод, в том числе и речных, сосредоточенных на поверхности и в почвогрунтах бассейна и пригодных для использования. Но суть, конечно, не в названии «норма», а в существе дела. Во всяком случае, всегда, когда речь идет о средних многолетних водных ресурсах, этому понятию надо давать однозначное определение.

Вторая трактовка термина «водные ресурсы» — это средний объем воды, сосредоточенной в водном объекте или в пределах территории в течение определенного интервала времени. В этом случае можно говорить о располагаемых водных ресурсах. Итак, надо различать норму водных ресурсов и располагаемые водные ресурсы. Использование этих определений позволяет однозначно определять объемы воды, сосредоточенной в любых водных объектах или в пределах любых территорий как в среднем за многолетие, так и в течение конкретного интервала времени.

Теперь надо рассмотреть эти понятия применительно к естественным водоемам — озерам. Норму реальных водных ресурсов озера определяют как объем воды, соответствующий среднему многолетнему положению его уровенной поверхности, и который можно использовать в народном хозяйстве. Большую часть этого объема будут составлять медленно возобновляемые стационарные запасы воды, отнесенные к наинизшему положению уровня за весь период наблюдений. Кроме того, в этот объем будет входить часть динамических запасов речных вод и часть динамических запасов влаги в атмосфере, которая в виде осадков поступает на поверхность водоема (за вычетом испарения с него). Последний источник будет иметь место только для тех озер, для которых в многолетнем разрезе характерно превышение осадков над испарением.

Располагаемые водные ресурсы озера будут соответствовать объему воды, отнесенному к среднему положению уровенной поверхности за рассматриваемый промежуток времени. Поскольку основной характеристикой уровня водоемов является его среднесуточное значение, постольку среднее положение уровенной поверхности озера при оценке располагаемых водных ресурсов целесообразно определять по среднему значению уровня, рассчитанному по его среднесуточным значениям за расчетный интервал времени. В формировании располагаемых водных ресурсов озера могут участвовать все три указанных источника, два или даже один — статические запасы воды. Последний случай, в частности, может иметь место тогда, когда средний за расчетный период уровень соответствует его наинизшему среднесуточному значению. Надо рассмотреть, как можно интерпретировать понятие «водные ресурсы» применительно к искусственным водным объектам — водохранилищам.

6.2. Предлагаемая трактовка понятия «водные ресурсы» водохранилищ

Водохранилища, в отличие от озер, являются искусственно созданными водоемами, уровенный режим которых регулируют с учетом требований различных отраслей народного хозяйства. Особенности природно-техногенной системы речной бассейн—водохранилище подробно рассмотрены в гл. 2. Эти особенности необходимо учитывать при рассмотрении термина «водные ресурсы» применительно к водохранилищам. Понятие нормы водных ресурсов для водохранилищ не имеет практического значения. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, понятие «норма» применяют при оценке среднего многолетнего объема воды природных объектов, соответствующего средним условиям естественного водообмена. Водохранилища являются искусственными образованиями и запасы воды в них лишь отчасти формируются за счет естественных факторов. Во-вторых, для водохранилищ установлены два основных характерных объема — мертвый объем, соответствующий уровню мертвого объема (УМО) и полный объем, соответствующий нормальному подпорному уровню (НПУ). Именно эти величины и полезный объем являются определяющими как при проектировании, так и при эксплуатации водохранилищ.

В то же время, для того чтобы иметь однозначные оценки возможных суммарных запасов воды в водохранилищах, введено понятие нормативных водных ресурсов водохранилища. Под нормативными водными ресурсами конкретного водохранилища надо понимать объем воды, сосредоточенный в пределах его чаши и соответствующий отметке НПУ, то есть полный объем водохранилища. Известно, что в реальных условиях до полного объема водохранилища наполняются лишь в определенные периоды и даже не каждый год. Однако использовать это понятие удобно, так как оно позволяет получать представление о максимально

возможных запасах воды в водохранилищах речного бассейна, административной территории, природного региона и страны в целом. Очевидно, что по мере ввода в эксплуатацию все новых и новых водохранилищ суммарные нормативные водные ресурсы водохранилищ будут возрастать. Об этом красноречиво свидетельствует график, приведенный в п. 7.1. Там же дана перспективная оценка нормативных водных ресурсов водохранилищ по бассейнам крупных рек СССР на период до 2005 г.

Располагаемые водные ресурсы водохранилищ определяют так же, как и для озер, по среднему значению ежедневных уровней воды за рассматриваемый период времени. Они формируются за счет мертвого объема водохранилища, динамических запасов речных вод, а также динамических запасов атмосферной влаги, выпадающей на поверхность водохранилища в виде осадков (за вычетом испарения с нее). Последний источник по аналогии с озерами будет иметь место только при условии превышения осадков над испарением. Надо обратить внимание на следующее обстоятельство. Мертвый объем можно рассматривать в качестве стационарного медленно возобновляющегося запаса воды только для озерных водохранилищ. Для речных водохранилищ, обладающих повышенным водообменом (см. п. 7.3), запас воды, содержащейся в мертвом объеме, может несколько раз обновляться в течение года. У крупных водохранилищ многолетнего регулирования вода сменяется в мертвом объеме в основном за 1—2 года. У водохранилищ годового и сезонного регулирования вода в мертвом объеме обновляется быстрее, так как ее запас в нем в 10—20 раз меньше годового объема речного стока.

Таким образом, располагаемые водные ресурсы речных водохранилищ формируются в основном за счет динамических запасов речных вод. Надо отметить еще одно важное обстоятельство. Как известно, сработку водохранилища ниже уровня мертвого объема, как правило, не допускают. Следовательно, изменения располагаемых водных ресурсов водохранилища определяются изменениями его полезного объема. Именно за счет этого объема регулируют речной сток, а также удовлетворяют потребности в воде различных водопотребителей. Все береговые инженерные сооружения также рассчитывают на колебания уровня в пределах от УМО до НПУ. Другими словами, при нормальной эксплуатации водохранилища любые народнохозяйственные нужды удовлетворяют за счет оптимального регулирования того объема располагаемых водных ресурсов, который находится выше УМО.

В формировании этого объема основная роль принадлежит поверхностному притоку. Проблема оценки многолетних колебаний притока воды к водохранилищам практически не исследована. Она имеет большое практическое и научное значение, например, при определении выработки электроэнергии на ГЭС, прогнозировании условий судоходства и решении других народнохозяйственных задач. Именно поэтому в настоящей главе уделено значитель-

ное внимание результатам исследования однородности и стационарности рядов притока воды к водохранилищам и закономерностям появления группировок лет, различающихся по водности.

6.3. Особенности суммарного притока воды к водохранилищам

Изучение закономерностей формирования притока воды в водохранилища с окружающей территории представляет несомненный научный интерес в связи с тем, что именно этот элемент водного баланса в сочетании с установленным полезным объемом определяет регулирующую способность водохранилищ.

В целях изучения закономерностей формирования суммарного притока воды в важнейшие водохранилища СССР в ГГИ под руководством и при участии автора в 1984—1985 гг. был выполнен комплекс научных исследований, завершившихся подготовкой в 1987 г. справочника «Многолетние характеристики притока воды к водохранилищам крупных ГЭС СССР» [113].

На основании полученных значений квартального, месячного и годового притока воды к 56 водохранилищам СССР были исследованы закономерности его многолетних колебаний. Результаты этих исследований приведены далее.

6.3.1. Оценка однородности и стационарности рядов годового притока воды к крупным водохранилищам

Ряды годового притока воды к крупным водохранилищам СССР, полученные при подготовке справочника [113], были подвергнуты анализу на однородность и стационарность. Чтобы получить наиболее устойчивые средние многолетние значения годового притока, исходные ряды притока рассчитаны за достаточно длительные промежутки времени, используя всю имеющуюся гидрометеорологическую информацию. Годовые значения притока определены не только за время эксплуатации водохранилищ, но и за достаточно продолжительные периоды, предшествовавшие их созданию. В последнем случае при расчетах притока воды к условному (еще не существовавшему) водохранилищу применены те же самые расчетные методики, которые использованы при оценках годового притока к эксплуатируемым водохранилищам.

Таким образом, для каждого из 56 водохранилищ, включенных в издание, получены исходные ряды наблюдений продолжительностью от 23 до 105 лет. Для оценки однородности и стационарности годового притока использованы ряды продолжительностью не менее 40 лет. В расчетах не использованы ряды, имеющие пропуски в наблюдениях. Всего проанализированы годовые ряды притока к 39 водохранилищам и в целом к Волжско-Камскому каскаду. Все расчеты выполнены на ЭВМ ЕС-1045 по программам, составленным В. А. Лобановым.

Под однородностью выборки, как известно, понимают принадлежность всех ее значений (элементов) одному и тому же закону распределения. Наличие внутрирядной и межрядной корреляции в рядах гидрологических характеристик не позволяет использовать критерии математической статистики в их классическом виде при оценке однородности таких рядов. Выполненный в ГГИ в 1975—1980 гг. цикл работ по анализу влияния корреляции на параметры законов распределения выборочных статистик позволил обобщить критерии однородности Диксона, Смирнова—Граббса и Колмогорова—Смирнова для последовательностей, имеющих корреляцию между смежными членами ряда [126]. Для анализа однородности рядов годового притока к водохранилищам использованы критерии Диксона (D), Смирнова—Граббса (G) и Дэвида (R/S). В расчетах учтены полученные в ГГИ уточненные критические значения статистик при уровне значимости $\alpha \leqslant 5\ \%$. Результаты выполненных расчетов приведены в прил. 8.

Как оказалось, статистически значимую неоднородность с вероятностью $P \geqslant 95\ \%$ имеет только ряд притока воды в Нижнетуломское водохранилище продолжительностью 49 лет. Отмеченная неоднородность связана с одним резко отклоняющимся значением притока воды за 1932 г. Анализ условий формирования стока в бассейне этого водохранилища показал, что 1932 г. был исключительно многоводным для рек этого района. Высокие расходы воды отмечены в этом году также на близко расположенных притоках Верхнетуломского водохранилища, озер Кундозеро, Топозеро и Пинозеро. Таким образом, проверка на однородность показала, что рассмотренные ряды годового притока к 38 крупным водохранилищам и Волжско-Камскому каскаду не противоречат принятой гипотезе однородности. И только один ряд не отвечает принятым критериям.

Под стационарностью ряда, как известно, понимают однородность выборочных статистических параметров во времени. В качестве последних выбраны среднее значение и дисперсия. Стационарность дисперсии рядов притока воды к водохранилищам оценена по методике ГГИ [126] с использованием критерия Фишера. Временно́й ряд разбивали сначала на две, затем на три части, потом на отдельные части, которые по результатам визуального анализа могли бы иметь наиболее различающиеся дисперсии. Затем попарно сравнивали дисперсии, вычисленные для различных частей ряда по критерию Фишера. Стационарность средних значений оценена с помощью критерия Стьюдента и путем оценки значимости линейного тренда значений притока воды во времени. В первом случае временно́й ряд разбивали на отдельные части так же, как при сравнении дисперсий. Значимость линейного тренда оценена по коэффициенту регрессии (b_1) или коэффициенту парной корреляции R между расходами воды и координатой времени. Для оценки любого вида тренда использованы также критерии Кокса — Стюарта ($K - C$) и коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r_S).

Результаты оценки стационарности дисперсий и средних значений по указанным критериям приведены в прил. 8. Анализ оценки стационарности дисперсий позволяет сделать следующие выводы.

1. Дисперсия ряда притока воды в Горьковское водохранилище за период 1931—1946 гг. в 4,9 раза меньше, чем за период 1947—1962 гг. Это различие является статистически значимым по критерию Фишера с вероятностью $P \geqslant 95\ \%$. Эти же периоды значимо различаются и по средним значениям. Указанные различия можно объяснить разной водностью выбранных для сравнения периодов. Так, известно, что в 30—40-е годы реки европейской части СССР имели пониженную водность.

2. Дисперсия ряда притока воды в Кумское водохранилище за период 1928—1951 гг. в 2,6 раза больше, чем за период 1952—1980 гг. Это связано с регулирующим влиянием вышерасположенных Иовской и Княжегубской ГЭС, вступивших в эксплуатацию в 1955—1960 гг. и обеспечивших многолетнее регулирование стока в течение большей части второго периода.

3. Для Зейского водохранилища дисперсия первой трети ряда (1901—1927 гг.) в 2,6 раза больше, чем второй его трети (1928—1953 гг.). Это связано с тем, что в течение первого периода амплитуда естественных колебаний годовых значений притока была намного выше, чем в течение второго.

4. Дисперсия ряда притока в Дзорагетское водохранилище за период 1932—1955 гг. в 3,6 раза меньше, чем за период 1956—1980 гг., что является статистически значимым по критерию Фишера. Это связано с большой амплитудой колебаний водности притока в течение второго периода по сравнению с первым. Средние значения притока за указанные периоды не имеют значимых различий.

5. Дисперсия ряда притока в Саратовское водохранилище за период 1915—1947 гг. в 2,6 раза больше, чем за период 1948—1980 гг. Также статистически значимо различие дисперсий, оцененных по критерию Фишера для двух рядов за периоды 1915—1936 гг. и 1959—1980 гг. Такие различия можно объяснить существованием периода пониженной водности в бассейне р. Волги в 30—40-х годах, а также большой амплитудой естественных колебаний годовых значений притока в период 1915—1935 гг.

6. Различие дисперсий рядов притока в Волгоградское водохранилище имеет те же особенности, что и различие дисперсий рядов притока к Саратовскому водохранилищу. Очевидно, что и причины этих различий будут аналогичны приведенным для Саратовского водохранилища.

В целом выполненный детальный анализ показал, что нестационарность дисперсий обусловлена естественными факторами.

Нестационарность средних значений можно характеризовать как монотонным, так и скачкообразным изменением их во времени. Индикатором монотонного изменения среднего значения является направленный линейный или нелинейный тренд во временно́й последовательности. Как видно из прил. 8, статистически

значимый линейный тренд отрицательного характера выявлен для рядов притока воды к Бухтарминскому, Иваньковскому, Иркутскому, Угличскому, Каунасскому и Волгоградскому водохранилищам. Направленные положительные изменения среднего значения имеют место для рядов притока к Зейскому и Воткинскому водохранилищам.

Что касается последнего водохранилища, то здесь имеет место не направленный тренд, а скачкообразное изменение среднего значения. Для большинства указанных водохранилищ оценка изменений средних значений по критерию Стьюдента также показала статистически значимые различия между средними значениями отдельных частей ряда.

Как видно из прил. 8, вклад направленного тренда средних значений притока составляет всего 7—15 % исходного рассеяния временно́го ряда. В связи с этим выявленную направленность изменений средних значений нельзя использовать в целях прогнозирования. Полученные оценки говорят лишь о том, что выявленные тренды статистически значимые, так как существует нестационарность или монотонная изменчивость средних значений.

Оценка изменений средних значений по критерию Стьюдента для тех рядов притока в водохранилища, для которых не выявлен однонаправленный тренд, показала, что статистически значимое возрастание среднего значения наблюдается для рядов притока в Чиркейское, Шекснинское и Орджоникидзевское водохранилища; статистически значимое скачкообразное уменьшение среднего значения — для рядов притока в Рыбинское и Нарвское водохранилища. Для двух последних рядов нестационарность среднего значения связана с формированием достаточно длительных маловодных периодов 1936—1950 гг. и 1967—1977 гг. (для Рыбинского водохранилища) и 1967—1977 гг. (для Нарвского водохранилища).

Таким образом, проведенный статистический анализ стационарности средних значений и дисперсий выявил семь рядов, имеющих нестационарные дисперсии и 13 рядов, имеющих нестационарные средние значения. Основная причина нестационарности рядов — наличие естественных периодов резко повышенной или пониженной водности.

6.3.2. Вероятности появления группировок лет различной водности и их продолжительность

Для большинства водохранилищ СССР характерна весьма значительная амплитуда колебаний годовых значений притока воды. Коэффициенты вариации годового притока изменяются от 0,20 (водохранилища лесной зоны) до 0,40 (водохранилища лесостепной, степной и полупустынной зон). Вследствие этого при анализе многолетних колебаний притока вод его годовые значения были отнесены к одной из трех групп водности: низкого притока (модульный коэффициент $K < 0{,}9$), среднего притока ($0{,}9 \leqslant K \leqslant 1{,}1$), высокого притока ($K > 1{,}1$). Многолетние ряды притока воды по каж-

дому из 52 водохранилищ расположили в хронологическом порядке значений, соответствующих той или иной группе водности (значение 1 присваивали маловодному, 2 — среднему по водности, 3 — многоводному году). По полученным данным на ЭВМ с использованием программы «Final» оценены вероятности смены лет различной водности для каждого отдельно взятого водохранилища. На рис. 6.1 в качестве примера приведена диаграмма, характеризующая закономерности смены годовых значений притока воды к Рыбинскому водохранилищу, выявленные при выполнении расчетов.

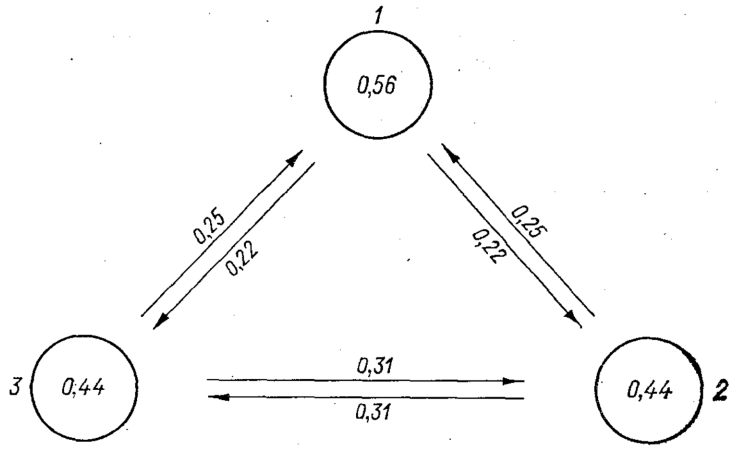


Рис. 6.1. Диаграмма вероятности смены категорий водности притока воды к Рыбинскому водохранилищу.
1 — маловодный год, *2* — средний по водности год, *3* — многоводный год.

Анализ полученных данных позволил сделать вывод о том, что закономерности ежегодной смены рассматриваемых категорий притока вод для отдельных водохранилищ строго индивидуальны. Однако общим для всех водохранилищ является достаточно высокая вероятность повторного появления лет, относящихся к одной и той же группе водности. Кроме того, результаты выполненных расчетов свидетельствуют о том, что для всех рассмотренных водохранилищ вероятность появления группировок лет любой из рассмотренных групп водности продолжительностью более четырех лет (пятилетка, шестилетка и т. д.) очень низкая, как правило, менее 1 %, хотя суммарная их вероятность может достигать 5 % и более.

Группировки лет различной водности, полученные для рассматриваемых водохранилищ, значительно различаются по продолжительности. Этим фактором, в частности, объясняется разный характер (крутизна и продолжительность) ветвей подъема и спада разностных интегральных кривых притока вод.

Автор совместно с В. И. Бабкиным, используя методику В. И. Бабкина — Н. К. Серкова [15], основанную на теории дискретных цепей А. А. Маркова, оценил вероятность появления

группировок лет трех категорий водности и их среднюю продолжительность. Вероятность появления группировок (в процентах) длительностью τ лет для рассматриваемых категорий водности определена по формуле

$$P^*_{i\tau} = 100\tau P^*_{\phi i}\left(1 - P^*_{ii}\right)^2 P^{*(\tau-1)}_{ii}, \qquad (6.1)$$

где P^*_{ii} — диагональные элементы матрицы вероятностей перехода, то есть вероятности повторного появления лет определенной водности (на рис. 6.1 приведены в кружках); $P^*_{\phi i}$ — финальная вероятность перехода для лет соответствующей водности.

Средняя продолжительность рассмотренных группировок притока оценена по выражению

$$\tau_{ср} = 1/(1 - P^*_{ii}). \qquad (6.2)$$

Все расчеты выполнены на ЭВМ с использованием программы «Final». Результаты расчетов для крупных водохранилищ основных речных бассейнов СССР приведены в табл. 6.1. Оказалось, что средняя продолжительность группировок лет любой из трех категорий водности составляет в большинстве случаев 1—2 года. За годом с малым притоком наиболее вероятно ожидать снова маловодный год. Очень мала вероятность смены маловодного года на

Таблица 6.1

Средняя продолжительность τ (годы) фаз водности притока и финальная вероятность их появления $P^*_ф$ (%)

Река	Водохранилище	Маловодная		Средняя по водности		Многоводная	
		τ	$P^*_ф$	τ	$P^*_ф$	τ	$P^*_ф$
Волга	Рыбинское	2,3	36,8	1,8	31,6	1,8	31,6
	Горьковское	2,3	42,4	1,7	27,9	2,0	29,7
	Чебоксарское	1,8	40,1	1,2	24,0	1,7	36,0
	Куйбышевское	2,1	38,4	1,4	25,9	1,9	35,7
	Саратовское	2,4	44,6	1,3	17,8	2,9	37,6
	Волгоградское	2,0	47,9	1,4	18,0	1,6	34,2
Кама	Камское	1,9	34,0	1,4	35,9	1,6	30,1
	Воткинское	2,9	52,8	1,2	9,96	3,1	37,2
	Нижнекамское	2,8	41,6	1,4	23,9	2,1	34,5
Урал	Ириклинское	2,6	53,8	1,5	18,4	1,7	27,8
Днепр	Киевское	1,9	37,9	1,3	30,1	1,8	32,0
	Каневское	2,4	42,7	1,6	26,0	2,2	31,3
Дон	Цимлянское	2,0	46,3	1,3	18,6	1,7	35,1
Кура	Мингечаурское	1,6	34,4	1,6	37,0	1,3	28,5
Обь	Новосибирское	1,6	40,6	1,3	31,3	1,6	28,1
Енисей	Саяно-Шушенское	1,4	34,0	1,5	43,5	1,4	22,5
	Красноярское	1,2	27,2	1,7	50,0	1,1	22,8
Ангара	Братское	1,7	29,5	2,1	49,9	1,4	20,6
	Усть-Илимское	1,7	24,9	1,7	44,3	1,2	30,8
Зея	Зейское	1,6	36,8	1,2	29,0	1,5	34,3
Сырдарья	Чардаринское	2,5	43,1	1,0	14,9	2,6	32,0
Вахш	Нурекское	1,1	24,8	2,3	50,8	1,5	18,4

многоводный. За средним по водности годом вероятнее всего наступление года средней водности. За многоводным годом вероятнее всего наступление среднего по водности года.

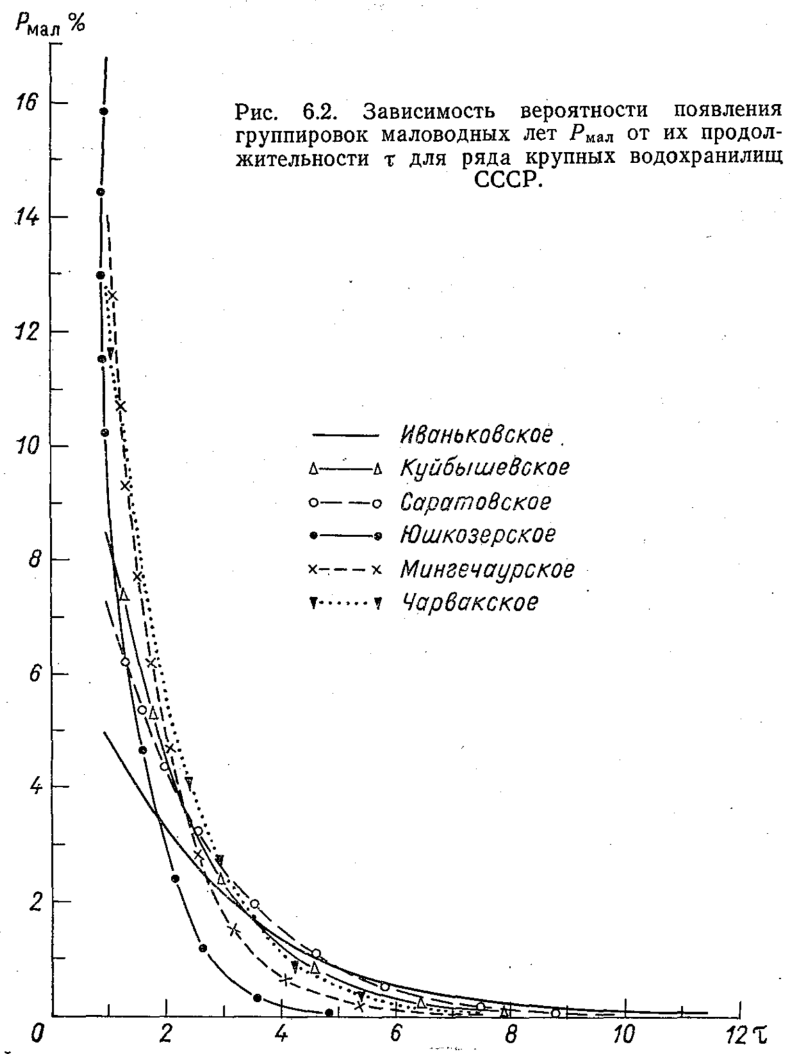


Рис. 6.2. Зависимость вероятности появления группировок маловодных лет $P_{мал}$ от их продолжительности τ для ряда крупных водохранилищ СССР.

Установлено, что та или иная вероятность появления группировок лет различных категорий водности и разной продолжительности определяется в основном климатическими факторами и практически не зависит от размеров бассейна. Выполненные расчеты показали, что чем продолжительнее группировки лет рассмотренных категорий водности, тем меньше вероятность их появления. В качестве примера приведен график, характеризующий вероятность наступления маловодных периодов определенной продолжительности для ряда водохранилищ СССР (рис. 6.2).

ГЛАВА 7. СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ВОДОХРАНИЛИЩ СССР

7.1. Водные ресурсы водохранилищ СССР, их изменение во времени и распределение по территории

В настоящее время в СССР насчитывают около 4 тыс. водохранилищ объемом более 1 млн м³ каждое. Что касается малых водохранилищ объемом менее 1 млн м³ (некоторые авторы относят их к категории прудов [165]), то их надежная количественная оценка затруднена из-за отсутствия государственного учета для этой категории водоемов. Они имеют сугубо локальное значение, их создают по решению местных органов для устранения водного дефицита в отдельные периоды года за счет перераспределения стока малых рек. Приведенные далее оценки водных ресурсов водохранилищ даны без учета этой категории водных объектов. В целом по СССР на уровень 1985 г. по данным паспортизации ЦНИИКИВРа общий объем воды в водохранилищах (оцененный для отметки НПУ) составил около 1025 км³ [73]. По данным А. Б. Авакяна и др. [2], этот объем равен 1200 км³. Учитывая, что на заполнение мертвого объема к этому сроку было израсходовано 568 км³ воды, суммарный полезный объем водохранилищ СССР на начало 1986 г. составлял 457 км³ (по Авакяну — 600 км³). Указанное общее количество воды было изъято из рек СССР в течение длительного периода от начала строительства водохранилищ в СССР до сегодняшних дней. По сравнению с ежегодно возобновляемым стоком рек СССР (примерно 4740 км³/год) указанный объем составляет около 22 %. Однако учитывая, что отдельные водохранилища заполнялись постепенно в течение многих лет, годовое суммарное изъятие речного стока на их заполнение было весьма незначительным и в период 1952—1985 гг. составило 6—70 км³/год, что менее 2 % годового стока рек. Хронологические графики годовых затрат воды на заполнение водохранилищ СССР (изменения нормативных водных ресурсов водохранилища) (рис. 7.1) даны для двух градаций водохранилищ в зависимости от их полного объема.

Надо отметить, что на заполнение 59 водохранилищ объемом более 1 км³ за период 1926—1985 гг. было затрачено 958,5 км³ воды, или 93,6 % общего объема воды, израсходованной на эти цели. Для остальных градаций получены следующие данные. На заполнение водохранилищ объемом от 101 млн м³ до 1 млрд м³ израсходовано 42,9 км³ воды (4,2 %), от 10 до 100 млн м³ — 14,9 км³ (1,4 %), от 1 до 10 млн м³ — 8,2 км³ (0,8 %). Как видно, на заполнение полных объемов небольших водохранилищ объемом 1—10 млн м³ ушло менее 1 % суммарных затрат воды, несмотря на то, что за этот период было введено в эксплуатацию 3267 таких водохранилищ. График (см. рис. 7.1а) характеризует также изменение регулирующей призмы водохранилищ и их мертвого объема по годам за период 1952—1985 гг. При оценке ежегодного

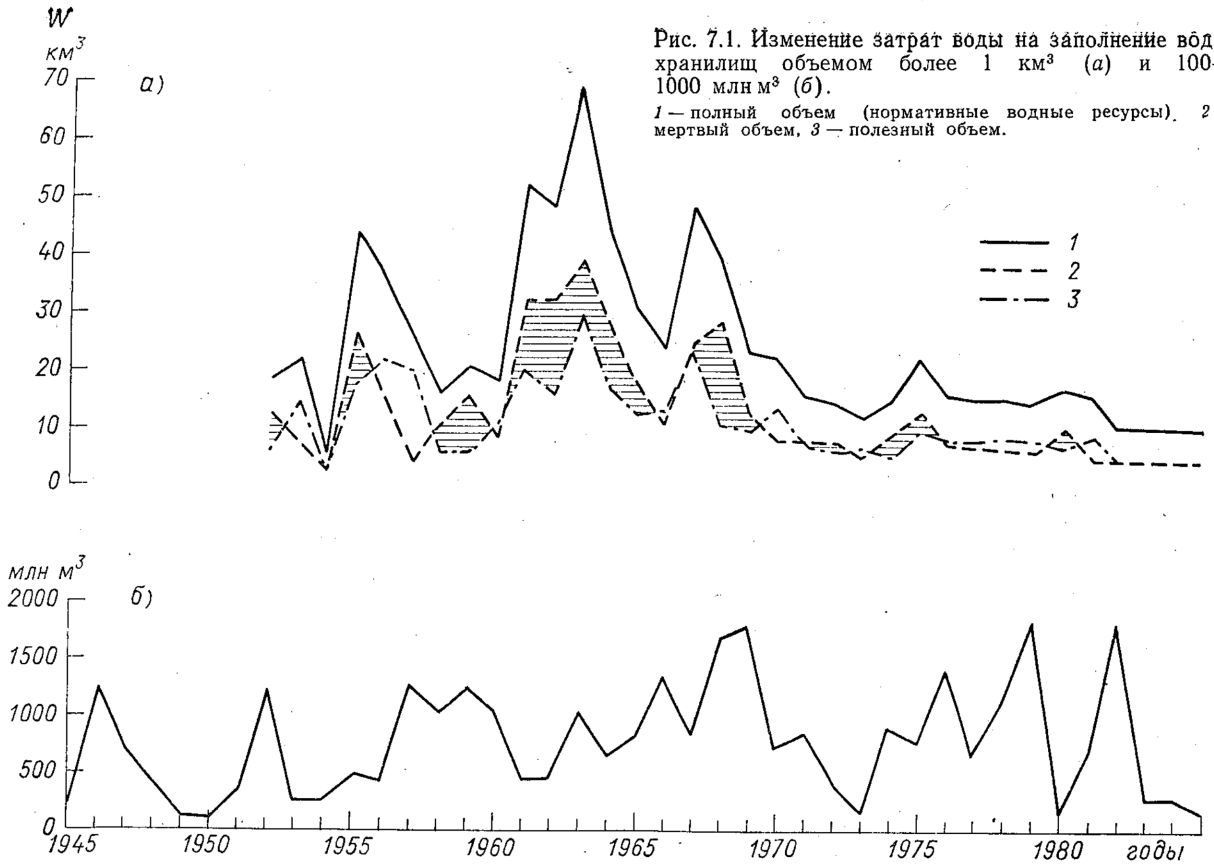


Рис. 7.1. Изменение затрат воды на заполнение водохранилищ объемом более 1 км³ (*а*) и 100—1000 млн м³ (*б*).

1 — полный объем (нормативные водные ресурсы), *2* — мертвый объем, *3* — полезный объем.

объема затрат воды для водохранилищ, период наполнения которых превышал 1 год, в расчет принята лишь та часть объема, которая заполнена в данном конкретном году. Анализ графиков показывает, что наиболее интенсивно водохранилища заполнялись в период 1960—1970 гг. В это время вступили в эксплуатацию крупнейшие сибирские водохранилища — Братское и Красноярское, достигли отметки НПУ Бухтарминское, Воткинское, Ириклинское, Чардаринское водохранилища, было начато наполнение Вилюйского водохранилища. С начала 70-х годов объемы изымаемой на эти цели воды стабилизировались в пределах 10—20 км^3/год.

По территории страны нормативные водные ресурсы водохранилищ распределены неравномерно (см. табл. 1.2). Бóльшая их часть приходится на РСФСР (78 %). Значительные регулирующие объемы сосредоточены в водохранилищах Украины, Казахстана и среднеазиатских республик (за исключением Туркмении). Такое распределение вполне естественно, так как именно эти республики имеют наибольший дефицит водных ресурсов, для ликвидации которого широко используют регулирование речного стока. В северных и западных районах европейской части СССР, где нет недостатка в воде, полезные объемы водохранилищ незначительны, например, в Белоруссии и Прибалтике.

Данные о нормативных водных ресурсах водохранилищ СССР и их изменения в годовом разрезе позволяют представить лишь общую картину суммарных изъятий речного стока на заполнение водохранилищ. Реальные возможности регулирования стока за конкретные временные периоды определяются тем объемом воды, который находился в эти промежутки времени в водохранилище выше УМО (то есть полезным объемом водохранилищ за рассматриваемый период). Для водохранилищ многолетнего регулирования основную роль в регулировании стока играют водные ресурсы отдельных лет, для водохранилищ сезонного регулирования — водные ресурсы отдельных месяцев и сезонов года. Так как располагаемые водные ресурсы водохранилищ прямо связаны с условиями формирования речного стока в их бассейнах, последний фактор надо обязательно учитывать при определении режимов регулирования стока водохранилищами. Эти вопросы рассмотрены в следующем пункте.

7.2. Особенности формирования водных ресурсов водохранилищ. Учет водности притока при регулировании стока водохранилищем

Источником формирования водных ресурсов водохранилищ могут быть различные категории вод (см. п. 6.2). В крупных озерных водохранилищах преобладают статические (медленно возобновляемые) запасы воды, которые в основном определяют их водные ресурсы. Для речных и наливных водохранилищ основным источником водных ресурсов являются динамические запасы воды

в руслах рек, то есть речной сток. Располагаемые водные ресурсы любого водохранилища в условиях его нормальной эксплуатации складываются из постоянного запаса воды, соответствующего УМО, и среднего объема воды за расчетный интервал времени, находящегося выше УМО. Другими словами, изменения располагаемых водных ресурсов водохранилища зависят от характера накопления и сработки запасов воды в пределах его сливной призмы. Этот процесс определяется особенностями притока воды в водохранилище и режимом ее сброса в нижний бьеф. Таким образом, водные ресурсы одиночного водохранилища формируются, с одной стороны, под воздействием естественных факторов (определяющих объем притока), а с другой — за счет искусственного регулирования сброса воды через подпорное сооружение. При каскадном расположении водохранилищ роль естественных факторов в формировании притока воды к ним снижается. Только боковая приточность формируется естественным путем. Основной же приток в значительной степени определяется характером сброса воды из вышерасположенного водохранилища.

Основная цель создания водохранилищ — устранение природной неравномерности речного стока путем искусственного регулирования режима сбросов в нижний бьеф. Это означает, что в формировании водных ресурсов водохранилища основная роль принадлежит искусственному фактору. Вместе с тем, при проектировании водохранилищ типовые режимы регулирования стока устанавливают с учетом его многолетней изменчивости и внутригодового распределения, обусловленных естественными гидрометеорологическими условиями в бассейне реки. Однако при реальном регулировании речного стока часто ориентируются на «средние» гидрометеорологические условия, то есть на некоторый средний объем притока, соответствующий годовой норме. Это нередко приводит к неоправданной сработке водохранилищ в маловодные периоды, вызывая негативные последствия для народного хозяйства (падение выработки электроэнергии на ГЭС, снижение навигационных глубин, выход из строя хозяйственно-питьевых водозаборов, расположенных в приводохранилищной зоне и др.).

Примером такого нерационального регулирования стока, ориентированного лишь на средние показатели водности рек, является эксплуатация ряда водохранилищ на крупных реках Сибири в период маловодья 1974—1982 гг., когда уровни воды в водохранилищах Братской, Усть-Илимской, Саяно-Шушенской, Красноярской, Новосибирской и Бухтарминской ГЭС упали до критических отметок, что привело к возникновению тяжелой водохозяйственной обстановки в верхних частях бассейнов Енисея, Ангары, Оби и Иртыша. Более подробный анализ возникновения этой ситуации дан в конце пункта. Для выяснения реального положения дел и с учетом естественных факторов формирования водных ресурсов водохранилищ при их эксплуатации выполнен анализ режимов многолетнего и сезонного регулирования стока крупными одиночными водохранилищами СССР и их каскадами совместно с ходом

притока воды к ним. Данная работа выполнена на примере 10 крупных одиночных водохранилищ, а также Волжского и Днепровского каскадов. Проанализированы хронологические графики изменений месячных и годовых объемов притока воды к водохранилищам за период 1952—1980 гг. совместно с ходом изменения их общих объемов за эти интервалы времени.

Установлено, что наиболее эффективно устраняют естественную неравномерность стока как внутри года, так и по годам, водохранилища многолетнего регулирования, полезный объем которых составляет 60 % и более по отношению к среднегодовому стоку в створе плотины. В этом отношении очень показателен пример Ириклинского водохранилища, для которого указанное соотношение, характеризуемое коэффициентом β, составляет 215 %. Несмотря на резкое снижение водности притока в период 1970—1976 гг., наполнение водохранилища поддержано на достаточно высоких отметках (рис. 7.2). В основном рациональный режим регулирования стока обеспечен и на других водохранилищах многолетнего регулирования: Мингечаурском ($\beta = 71$ %), Цимлянском ($\beta = 65$ %), Рыбинском ($\beta = 55$ %). Однако в отдельные маловодные периоды эффективность регулирования стока этими водохранилищами снижалась за счет неэкономной сработки накопленного запаса воды при ориентировке на средние условия водности. Так, не накоплено достаточного количества воды в Цимлянском и Бухтарминском водохранилищах к началу маловодного периода 1970—1976 гг., вследствие чего запасы воды в них ежегодно снижались, приблизившись в 1976—1977 гг. к мертвому объему. На Цимлянском водохранилище с 1965 по 1976 г. вообще регулировали сток на пониженных отметках (см. рис. 7.2). Рыбинское водохранилище даже во время многоводного периода в 1956 г. было сработано ниже УМО. Во время маловодья 1971—1977 гг. его эксплуатировали также на отметках, близких к критическим (особенно в 1976 и 1977 гг.). При этом следует иметь в виду, что Рыбинское водохранилище — часть Волжско-Камского каскада. Приток к нему регулируется Иваньковским и Угличским водохранилищами на Волге и Шекснинским на р. Шексне. В этом случае речь уже идет о плохом учете естественных условий формирования притока не только в бассейне Рыбинского, но и на водосборах вышерасположенных водохранилищ каскада.

При сезонном регулировании стока его неравномерное внутригодовое распределение наилучшим образом устраняют водохранилища, являющиеся нижними ступенями каскадов. Примерами таких водохранилищ могут служить Куйбышевское на Волге и Каховское на Днепре. При эксплуатации одиночных водохранилищ сезонного регулирования не всегда учитывают водность года, что приводит к их интенсивной сработке, нередко ниже УМО. Так, например, Красноярское водохранилище в период 1978—1983 гг. (в 1979, 1980 и 1982 гг.) трижды сработано ниже УМО, несмотря на то, что в летний период 1979 г. оно было наполнено почти до отметки НПУ, а летом 1980 г. этот уровень был достигнут. Ярким

примером нерационального регулирования стока является режим эксплуатации Кайраккумского водохранилища сезонного регулиро-

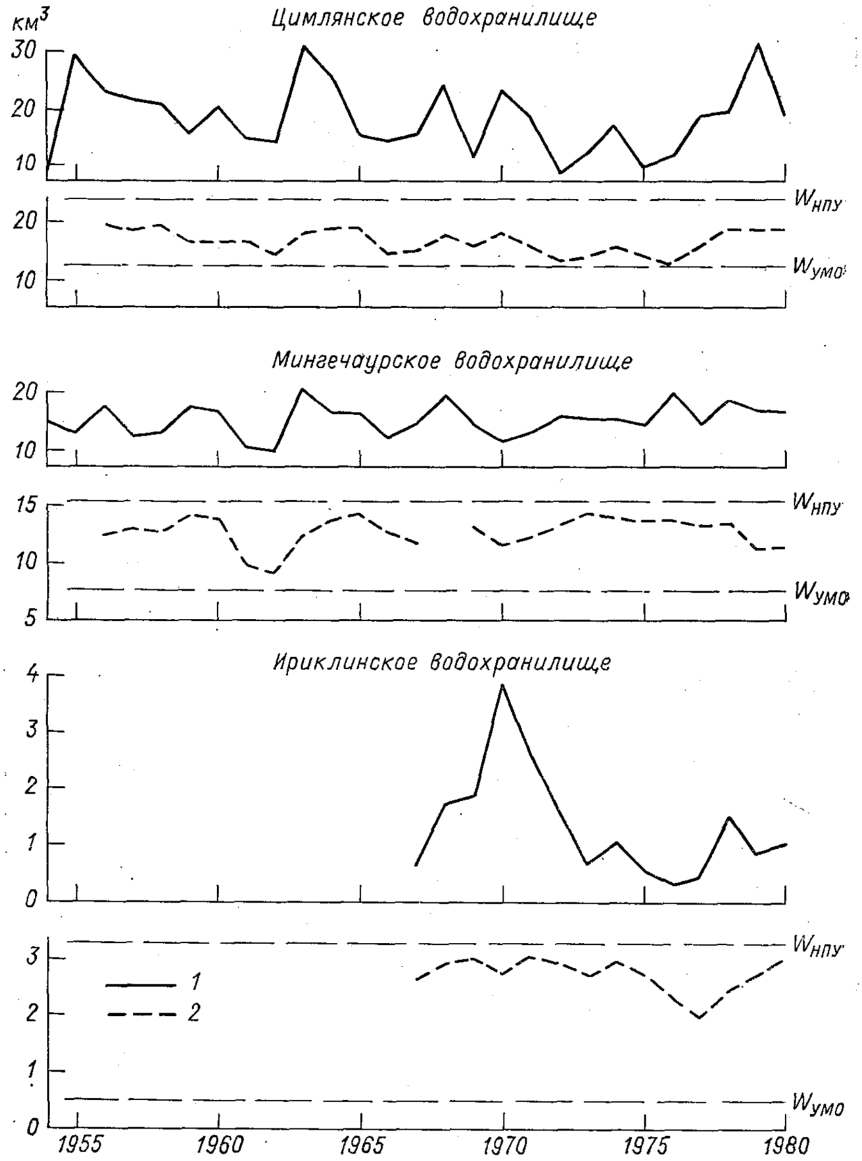


Рис. 7.2. Изменение среднегодовых значений притока (*1*) и объема воды (*2*) в некоторых крупных водохранилищах многолетнего регулирования.

вания (рис. 7.3). За период 1973—1980 гг., отличающийся пониженной водностью, водохранилище пять лет подряд срабатывали ниже УМО (особенно значительно в 1975 и 1977 гг.). При этом

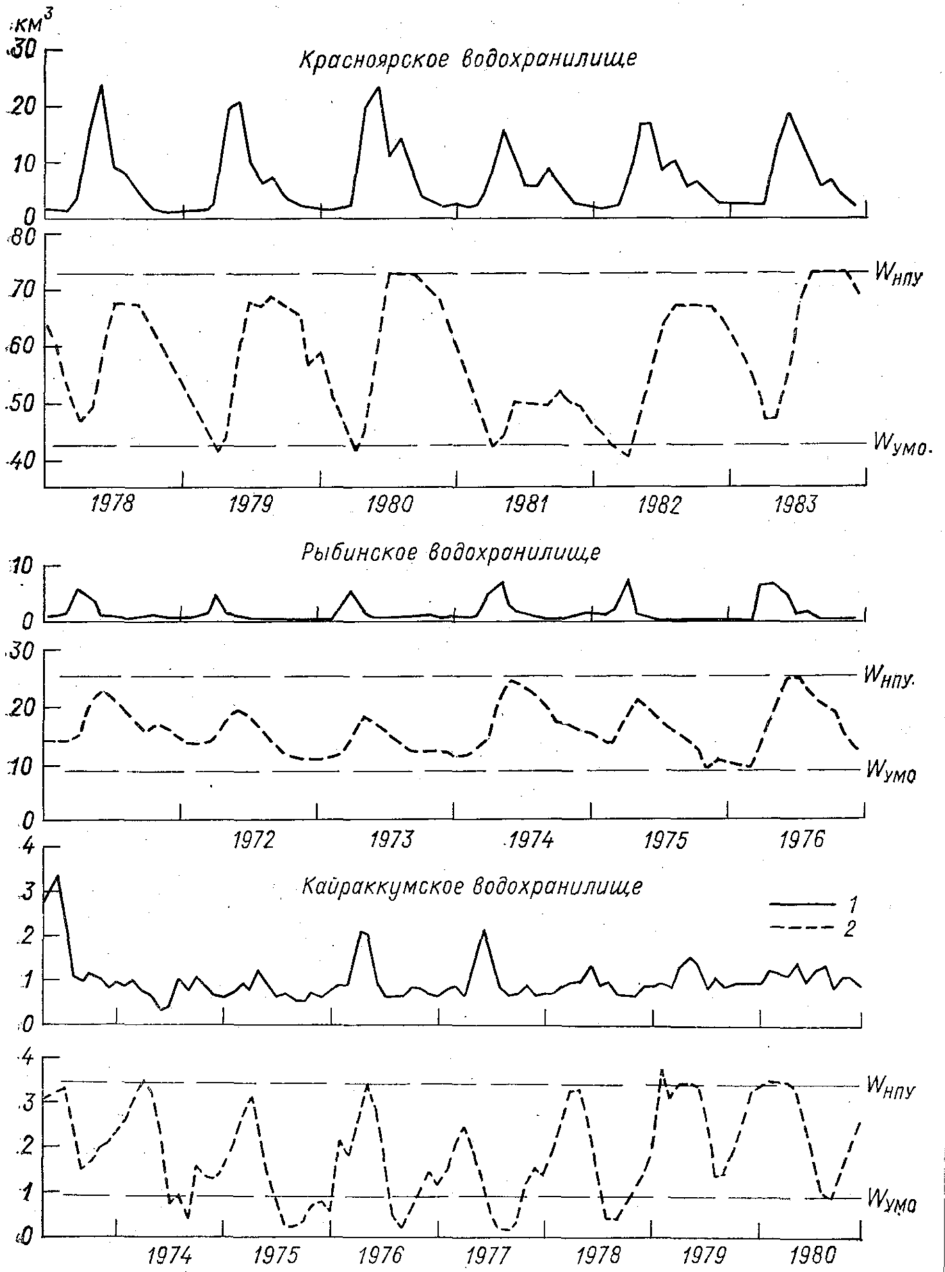


Рис. 7.3. Изменение среднемесячных значений притока (*1*) и объема воды (*2*) в некоторых крупных водохранилищах сезонного регулирования.

весной в эти годы отметки водохранилища нередко достигали НПУ.

Результаты выполненного анализа свидетельствуют о том, что эксплуатация водохранилищ, ориентированная во многих случаях на средние условия водности притока может вызывать в маловодные периоды сравнительно быструю сработку их полезных объемов и функционирование водохранилищ на пониженных отметках, что нередко приводит к нерациональному использованию их водных ресурсов. Более подробно такая ситуация рассмотрена на примере ряда сибирских водохранилищ многолетнего регулирования.

Как известно, многолетнее регулирование стока ведут в расчете на некоторую гарантированную выработку энергии на ГЭС, которая обеспечивается за счет постоянной сработки многолетнего запаса воды в течение критического по стоку маловодного периода. Эта гарантированная выработка энергии, естественно, меньше средней многолетней. Поэтому при планировании ежегодной выработки энергии, ориентированной на средние условия водности, совершенно не учитывают реальные особенности формирования стока в конкретном году. Кроме того, при современном планировании выработки энергии на ГЭС не принимают во внимание реальное состояние многолетнего запаса воды на текущий момент времени. Если этот запас существенно истощен, то фактически возможно лишь сезонное регулирование стока в данном году, и даже при средних условиях водности не приходится ожидать увеличения запаса воды в водохранилище на конец года. Следовательно, обеспечение надлежащего рабочего напора на ГЭС в последующем возможно лишь путем восстановления запаса воды за счет снижения выработки электроэнергии.

Таким образом, существующая практика планирования выработки энергии на ГЭС с водохранилищами многолетнего регулирования не учитывает особенностей формирования стока как в многолетней перспективе, так и в конкретные годы.

В начале 80-х годов из-за устойчивого маловодья в бассейне оз. Байкал и в верхних частях бассейнов крупнейших сибирских рек Ангары и Иртыша резко уменьшился приток воды к Иркутскому, Братскому, Усть-Илимскому и Бухтарминскому водохранилищам многолетнего регулирования. Уровни воды в водохранилищах упали до критических отметок, что привело к созданию сложной водохозяйственной обстановки в этих регионах. Возникла необходимость в анализе гидрометеорологических условий формирования маловодья и выяснении причин столь неблагоприятного воздействия маловодья на гидроэнергетику и другие отрасли народного хозяйства. Анализ данных по стоку показал, что с 1974 г. на реках обширной территории Сибири, лежащей к югу от 55° с. ш. и охватывающей верхние части Обь-Иртышского и Ангаро-Енисейского бассейнов наступила фаза пониженной водности. Годовой сток Ангары и Иртыша в их верхнем течении, а также рек, впадающих в оз. Байкал, в течение длительного периода оставался ниже нормы. Наступление маловодной фазы привело к сокращению

притока воды к озеру Байкал и ангарским водохранилищам и к значительному снижению их уровней (рис. 7.4).

Уменьшение водности рек в рассматриваемых районах Сибири было обусловлено прежде всего уменьшением осадков, особенно четко проявившемся в конце 70-х годов. Наступивший маловодный период не был каким-либо выдающимся событием. Аналогичные периоды пониженной водности имели место и в прошлом. Важно отметить, что расчетные характеристики стока рек, положенные в 50—60-х годах в основу проектов крупных ГЭС на сибирских реках, не изменились в связи с накопленной дополнительной информацией. В проектах предусмотрена возможность нормальной эксплуатации сибирских ГЭС в условиях маловодных периодов, близких по своим параметрам к маловодью конца 70-х годов.

Маловодному периоду на всех реках рассматриваемого региона предшествовала довольно устойчивая продолжительная фаза повышенной или средней водности, что в определенной мере создавало иллюзию избытка водных ресурсов. В это время Иркутская, Братская и Бухтарминская ГЭС работали на полную мощность. Строилась Усть-Илимская ГЭС, водохранилище которой было подготовлено к наполнению. Интенсивный рост энергопотребления требовал максимально возможной выработки электроэнергии на ГЭС, несмотря на крайне неблагоприятные гидрометеорологические условия, обусловившие маловодье на реках. Планирование ежегодной выработки энергии по средним многолетним значениям стока, т. е. без учета реально сложившейся гидрометеорологической обстановки, привело к неосмотрительному расходованию водных ресурсов водохранилищ в надежде на более высокую водность последующих лет. Негативные последствия такого планирования не замедлили сказаться. В 1974—1976 гг. в начале маловодного периода (см. рис. 7.4*а*) выработка энергии на ГЭС Ангарского каскада на 17—20 % превышала гарантированную (см. рис. 7.4*д*), что привело к резкой сработке запасов воды Иркутского и Братского водохранилищ. Снижение уровней воды в верхнем бьефе Иркутской ГЭС стало заметным начиная с 1977 г., а в отдельные месяцы 1980 и 1981 гг. уровень падал ниже уровня УМО и подпор не распространялся на оз. Байкал. Уровень Братского водохранилища начал устойчиво снижаться с 1974 г. За 3 года он упал более чем на 3м. И хотя в последующие годы выработка электроэнергии была сокращена и составила 90—95 % гарантированной, этого оказалось недостаточно и уровень Братского водохранилища понизился еще на 4 м (см. рис. 7.4). К концу 1981 г. Братское водохранилище оказалось сработанным до УМО и перешло в режим сезонного регулирования, что крайне невыгодно как для Братской ГЭС, так и для всего каскада в целом.

Вследствие неучета сложившихся в конце 70-х годов неблагоприятных гидрометеорологических условий в бассейне Верхнего Иртыша мертвый объем Бухтарминского водохранилища к весне 1982 г. оказался сработанным на 3 км^3.

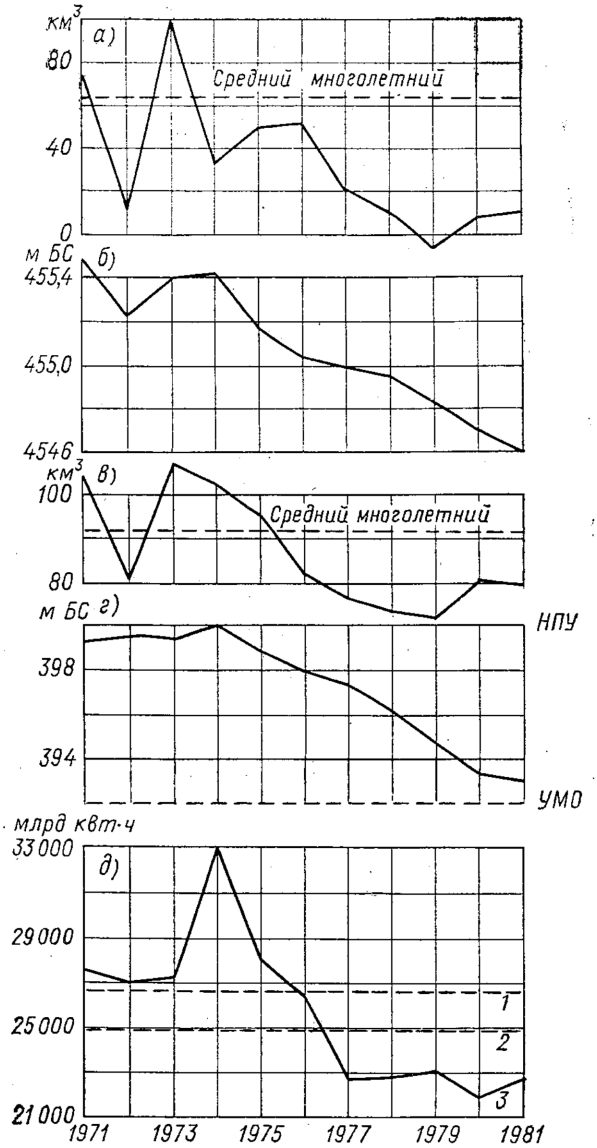


Рис. 7.4. Полезный приток (*а*, *в*) и ход уровня воды (*б*, *г*) оз. Байкал (*а*, *б*) и Братского водохранилища (*в*, *г*) и суммарная выработка электроэнергии Иркутской и Братской ГЭС (*д*).

1, *2*, *3* — средняя, гарантированная и суммарная выработка электроэнергии соответственно.

Глубокая сработка водохранилищ Ангарского каскада и Бухтарминского водохранилища помимо сокращения выработки электроэнергии нанесла большой ущерб хозяйственно-питьевым водозаборам, расположенным в верхних бьефах, водному транспорту и лесосплаву.

Приведенный пример свидетельствует, с одной стороны, о необходимости учета текущих гидрометеорологических условий формирования стока при назначении режимов его регулирования, а с другой — о важности разработки методов сверхдолгосрочных прогнозов речного стока в целях предвидения периодов, приходящихся на фазы пониженной водности притока и напряженных с точки зрения выработки электроэнергии.

7.3. Основные показатели водообмена крупных водохранилищ. Водообмен и качество воды

Для оценки интенсивности водообмена в водохранилищах[1] В. Н. Штефан [160] предложил следующее выражение:

$$K_в = (I + Q)/(2\bar{W}), \qquad (7.1)$$

где I — приток воды в водохранилище; Q — сток из водохранилища; $\bar{W}$ — средний объем воды в водохранилище за расчетный интервал времени.

Данное выражение позволяет оценить влияние горизонтальной составляющей (то есть речного стока) в общем процессе обмена воды в водохранилище как в среднем за многолетний период, так и за конкретные отрезки времени. Ранее многие исследователи оценивали средние многолетние значения интенсивности водообмена как частное от деления либо объема годового притока, либо объема стока на среднегодовой объем воды в водохранилище [23, 74, 128].

В двух последних случаях результаты расчетов различаются между собой, так как вне поля зрения остается вертикальная составляющая водообмена, которая формируется за счет разности осадков и испарения, а также годовые изменения запаса воды в водохранилищах многолетнего регулирования. Выражение (7.1) имеет преимущество перед двумя другими приемами, так как позволяет однозначно определять интенсивность водообмена в любую фазу гидрологического режима. Другими словами, с учетом данной автором трактовки понятия «водные ресурсы водохранилищ» (см. п. 6.2), коэффициент водообмена будет характеризовать долю водных ресурсов водохранилища, которая сменится в процессе горизонтального водообмена за расчетный интервал времени. Если оценивать коэффициент водообмена для средних многолетних условий, то речь пойдет о сменяемости нормативных водных ресур-

[1] Речь идет об осредненных для водохранилища показателях водообмена, и не рассмотрены особенности водообмена в различных частях водохранилища.

Таблица 7.1

Показатели водообмена крупных водохранилищ

Водохранилище	Полный объем при НПУ, км³	Элемент водообмена, км³/год		$T_у$ лет	t лет
		приток	осадки		
Андижанское	1,9	3,8	<0,1	0,5	1,5
Араксинское	1,4	5,8	<0,1	0,2	0,6
Братское	169,3	91,3	1,6	1,8	5,4
Бухтарминское	49,6	19,7	1,1	2,4	7,2
Верхнетуломское	11,5	5,9	0,4	1,8	5,4
Вилюйское	35,9	18,1	0,6	1,9	5,7
Волгоградское	31,5	237,2	1,2	0,1	0,3
Воткинское	9,4	53,7	0,6	0,2	0,6
Выгозерско-Ондское	6,4	6,3	0,8	0,9	2,7
Горьковское	8,8	46,6	1,0	0,2	0,6
Днепровское	3,3	47,5	0,2	0,1	0,3
Днепродзержинское	2,5	48,9	0,3	0,1	0,3
Зейское	68,4	23,0	1,2	2,8	8,4
Иваньковское	1,1	9,2	0,2	0,1	0,3
Имандровское	11,2	5,3	0,6	1,9	5,7
Иовское	2,1	7,0	0,2	0,3	0,9
Ириклинское	3,3	1,4	<0,1	2,3	6,9
Иркутское (с оз. Байкал)	23 002	62,3	12,2	308,8	926,4
Кайраккумское	4,2	15,5	<0,1	0,3	0,9
Камское	12,2	52,8	0,9	0,2	0,6
Каневское	2,5	34,3	0,3	<0,1	0,2
Капчагайское	28,1	15,2	0,3	1,8	5,4
Каховское	18,2	47,9	1,0	0,4	1,2
Киевское	3,7	34,4	0,5	0,1	0,3
Княжегубское	3,4	8,5	0,4	0,4	1,2
Костешты-Стынка	1,1	2,4	<0,1	0,4	1,2
Краснодарское	3,0	13,6	0,3	0,2	0,6
Красноярское	73,3	87,0	0,7	0,8	2,4
Кременчугское	13,5	45,1	1,0	0,3	0,9
Кубенское	1,7	4,4	0,5	0,3	0,9
Куйбышевское	58,0	235,7	2,7	0,2	0,6
Кумское	9,8	3,6	1,2	2,0	6,0
Курейское	10,0	19,2	0,5	0,5	1,5
Мингечаурское	15,7	12,0	0,2	1,3	3,9
Нижнекамское	12,9	87,7	0,6	0,1	0,3
Новосибирское	8,8	55,2	0,4	0,2	0,6
Нурекское	10,5	19,0	<0,1	0,6	1,8
Павловское	1,4	10,1	<0,1	0,1	0,3
Пиренгское	3,0	1,5	0,1	1,9	5,7
Пролетарское	2,0	0,3	0,4	2,9	8,7
Рыбинское	25,4	30,1	2,1	0,8	2,4
Саратовское	12,9	231,0	0,8	0,1	0,3
Саяно-Шушенское	31,3	46,7	0,3	0,7	2,1
Сегозерское	4,7	2,2	0,5	1,7	5,1
Серебрянское	2,9	3,1	0,1	0,9	2,7
Токтогульское	19,5	11,6	0,1	1,7	5,0
Тюямуюнское	7,3	32,8	<0,1	0,2	0,7
Угличское	1,2	11,0	0,1	0,1	0,3
Усть-Илимское	58,9	100,4	0,8	0,6	1,8

Водохранилище	Полный объем при НПУ, км³	Элемент водообмена, км³/год		$T_у$ лет	t лет
		приток	осадки		
Хантайское	23,5	16,1	2,1	1,3	3,9
Цимлянское	23,9	18,8	1,1	1,2	3,6
Чарвакское	2,0	6,0	$<0,1$	0,3	0,9
Чардаринское	5,7	13,9	0,2	0,4	1,2
Чебоксарское	12,6	109,5	1,2	0,1	0,3
Шекснинское	6,5	4,6	0,9	1,2	3,6
Юшкозерское	3,8	3,1	0,2	1,2	3,5

сов водохранилища, а если для конкретных интервалов времени — располагаемых.

Во многих случаях более удобно определять показатель водообмена во временны́х единицах, как величину, обратную коэффициенту $K_в$. Такой подход предложен, например, у Г. П. Калинина [89]. У А. В. Караушева при рассмотрении интегральных показателей для оценки качества воды и загрязненности водоемов также использован показатель водообмена, выраженный в единицах времени [91]. Преимущество такого подхода заключается в том, что значение коэффициента водообмена сразу показывает, в течение какого времени произойдет смена массы воды в водоеме (водообмен) при условии равномерного по всему поперечному сечению вытеснения «старой» воды «новой». Пусть показатель $T_у = 1/K_в$. Если учитывать не только горизонтальную, но и вертикальную составляющую водообмена, то выражение для определения коэффициента $T_у$ с учетом формулы (7.1) примет вид:

$$T_у = 2\overline{W}/(I + P + E + Q). \tag{7.2}$$

При расчетах в среднем за многолетний период выражение (7.2) упрощают:

$$T_у = \overline{W}/\alpha, \tag{7.3}$$

где α — показатель внешнего водообмена, который может быть равен $(I + P)$ или $(E + Q)$.

Если в выражениях (7.2) и (7.3) $\overline{W}$ заменить на $W_{НПУ}$, то коэффициент $T_у$ можно трактовать как показатель времени, в течение которого происходит полная смена нормативных водных ресурсов. По преобразованной таким образом формуле (7.3) рассчитаны средние значения коэффициента $T_у$ для 56 крупных водохранилищ за многолетний период (табл. 7.1). Полученные данные показали, что для большинства крупных речных водохранилищ указанный коэффициент меньше 1, то есть смена нормативных водных ресурсов этих водохранилищ может происходить менее чем за год. Малые значения этого коэффициента (менее 0,2) характерны для речных водохранилищ, расположенных на крупных реках, таких как

Волга, Днепр и Обь. Крупные озерные водохранилища характеризуются более продолжительным периодом смены нормативных водных ресурсов, который может быть 1,5 ... 2,0 года и более (Бухтарминское, Верхнетуломское, Имандровское, Кумское, Перингское, Сегозерское водохранилища).

Значения показателей водообмена, определенные для крупных водохранилищ за месячные интервалы времени, характеризуются большим диапазоном изменений. Чем меньше полный объем водохранилища и чем меньше различие между ним и объемом месячного меженного стока, тем больше амплитуда колебаний коэффициента $T_у$. Так, например, месячные значения коэффициента $T_у$, определенные для Ириклинского водохранилища за период 1965—1980 гг., которое имеет полный объем при НПУ 3,3 км^3, а объем меженного стока около 2 км^3/мес изменяются от 1,3 мес (период весеннего половодья) до 71 мес (зимняя межень). В то же время для Куйбышевского водохранилища (полный объем 58 км^3, среднемесячный меженный сток около 25 км^3) диапазон изменений этого коэффициента за период 1958—1980 гг. составил 0,67 ... ... 4,9 мес. Наименьшей изменчивостью отличаются эти коэффициенты у водохранилищ, являющихся нижними ступенями каскадов. Так, месячные значения коэффициента $T_у$ для Саратовского водохранилища за период 1969—1980 гг. изменялись от 0,45 до 1,6.

А. В. Караушев назвал параметр $T_у$ условным показателем водообмена. Этот показатель входит в число интегральных показателей, применяемых при оценке качества вод в озерах и водохранилищах, в частности, при определении выноса растворенных веществ из водоема [109]. Вполне очевидно, что чем меньше значения показателя $T_у$ при прочих равных условиях, тем более интенсивно происходит смена массы воды в водохранилище и, следовательно, более интенсивно протекают процессы самоочищения и разбавления.

Как показали исследования, от скорости водообмена зависит также интенсивность цветения воды в водохранилищах степной зоны. Установлено, что период водообмена, равный 10 сут, для них обычно является предельным [43]. При большем сроке водообмена может начаться цветение. Согласно выполненным расчетам, указанная интенсивность водообмена в крупных водохранилищах наблюдается лишь в период весеннего половодья. Следует иметь в виду, что помимо низкой интенсивности водообмена для развития процесса цветения необходимо, чтобы водоем относился к мезотрофному или евтрофному типу и в нем накапливались химические или биологические вещества. Такие условия создаются в водохранилищах, расположенных на реках южной зоны — Волге, Днепре, Доне и др. Расчеты водообмена показали, что все водохранилища на этих реках предрасположены к цветению в течение всех летних месяцев. Особенно подвержены цветению мелководные зоны водохранилищ, расположенные вдали от транзитного течения, где скорости водообмена намного ниже по сравнению со средним показателем. Таким образом, показатели водообмена $K_в$

или $T_у$ позволяют оценить интенсивность или период смены определенного объема воды в водохранилище по модели водоема-вытеснителя. Их средние многолетние значения можно использовать в качестве параметров расчетных формул при оценке качества воды в водоемах. Так, например, коэффициент $T_у$ входит в расчетные зависимости по оценке изменения во времени фоновой концентрации вещества в водоеме. Вместе с тем, модель водоема-вытеснителя не учитывает наблюдающегося в реальных условиях процесса смешения «старой» и «новой» воды в водоеме. Для такого случая предложена модель водоема-смесителя, предполагающая, что при поступлении в водоем «новая» вода мгновенно смешивается со «старой» и из водоема сбрасывается уже смесь «старой» и «новой» воды. Согласно этой гипотезе, для замены в водоеме всей «старой» воды на «новую» требуется значительно больший интервал времени по сравнению с тем, который определяют по модели водоема-вытеснителя. Согласно исследованиям Г. П. Калинина и А. В. Караушева, долю «старой» воды в общем объеме $W_{ст}/W$, которая останется в водоеме к концу расчетного периода при условии установившегося равномерного режима водообмена, можно определить по выражению

$$W_{ст}/W = \exp(-\alpha t/W), \tag{7.4}$$

а долю «новой» воды $W_н/W$, поступившей в водоем и оставшейся в нем до конца расчетного периода, можно определить по формуле

$$W_н/W = B = 1 - \exp(-\alpha t/W). \tag{7.5}$$

В формулах (7.4) и (7.5) t — продолжительность расчетного периода. В. Н. Штефан и К. К. Эдельштейн назвали параметр B показателем водообновления [162]. Он, так же как и показатель $K_в$, характеризует интенсивность обмена вод в водоеме, но уже с учетом смешения «старой» и «новой» воды по модели водоема-смесителя. Данный показатель позволяет сравнивать различные водоемы по интенсивности водообмена, его можно использовать в расчетных схемах по оценке качества воды водоемов [109]. Штефан и Эдельштейн выполнили статистическую обработку массовых данных натурных наблюдений за водным и гидрохимическим режимом Можайского водохранилища в целях установления зависимости между коэффициентом водообмена $K_в$ и фактическим значением коэффициента водообновления B. Полученная ими эмпирическая кривая зависимости $K_в = f(B)$ оказалась близка к теоретической кривой, полученной для водоема-смесителя [167].

А. В. Караушев использовал данные выражения для приближенных вычислений времени замены массы воды (t) в ряде озер и водохранилищ при оценке их качества.

Как известно, погрешности расчетов различных показателей качества воды в водоемах в настоящее время составляют не менее ±5 %. С учетом этого обстоятельства автор принимает показатель водообновления $W_н/W = 0{,}95$, считая, что в этом случае

практически вся «старая» вода будет заменена на «новую» (при 100 %-ной замене воды уравнение не имеет решения). Тогда уравнение (7.5) после ряда преобразований, решенное относительно t, примет вид

$$t = 2{,}99T_{\text{у}}. \qquad (7.6)$$

Полученное выражение (7.6) свидетельствует о том, что время практически полной замены воды по схеме водоема-смесителя в 3 раза больше времени водообмена по модели водоема-вытеснителя. Количественные данные о времени водообновления t, полученные для крупных водохранилищ, приведены в табл. 7.1. Эти данные характеризуют время полной смены объема воды в водохранилище при НПУ. В реальных условиях, как показали расчеты, средний за год объем воды в водохранилищах составляет 60...90 % их полного объема при НПУ. Поэтому приведенные в табл. 7.1 данные несколько преувеличенны. Тем не менее, они отражают общую картину временной сменяемости водных масс водохранилищ с учетом смешения «старой» и «новой» воды.

В крупных речных водохранилищах период полного водообновления в реальных условиях составляет обычно не более одного года (исключение составляют крупнейшие речные водохранилища, расположенные на реках, сток которых меньше полного объема водохранилищ — Братское, Вилюйское, Зейское, Ириклинское, Капчагайское, Мингечаурское, Токтогульское, Цимлянское). Длительность периода полной смены воды в озерных водохранилищах существенно больше и может составлять 3...8 лет.

7.4. Перспективная оценка водных ресурсов водохранилищ СССР

В основу выполненной прогнозной оценки нормативных водных ресурсов водохранилищ объемом более 100 млн м³ положены перспективные данные о водохранилищах, намечаемых к сооружению в бассейнах основных рек СССР. Данные получены по материалам отраслевых Схем развития энергетики и мелиорации, составленных в 1986—1988 гг. В соответствии с этими материалами в СССР с 1986 г. до 2005 г. предусмотрено соорудить 74 водохранилища объемом более 100 млн м³ каждое (прил. 10). К 2005 г. на заполнение котловин водохранилищ будет израсходовано 382 км³ воды (за все предыдущие годы в водохранилищах СССР было накоплено 1025 км³ воды). Таким образом, суммарные запасы воды в водохранилищах СССР к 2005 г. составят 1407 км³ воды. Объем регулирующей призмы водохранилищ увеличится на 141 км³ и достигнет к 2005 г. 598 км³. Приращение полных и полезных объемов водохранилищ по пятилетиям приведено на рис. 7.5. Данные рисунка свидетельствуют о том, что в ближайшие 20 лет сохранится тенденция все возрастающего прироста нормативных водных ресурсов водохранилищ от пятилетки к пятилетке. Вместе с тем, следует отметить, что доля суммарного полезного

объема в общем приросте объемов будет сокращаться. Если в 1986—1990 гг. эта доля составила 56 %, то в период 1996—2005 гг. намечается ее снижение до 30 %. Причиной снижения будет планируемое создание ряда крупнейших водохранилищ на равнинных реках Сибири, мертвый объем которых составит 60...70 % их суммарных водных запасов. Эта тенденция явно негативная, так как приводит к неоправданному затоплению больших территорий. Во всем мире при строительстве водохранилищ наблюдают обратную картину — сокращение доли мертвого объема в общем объеме водохранилищ. В развитых капиталистических

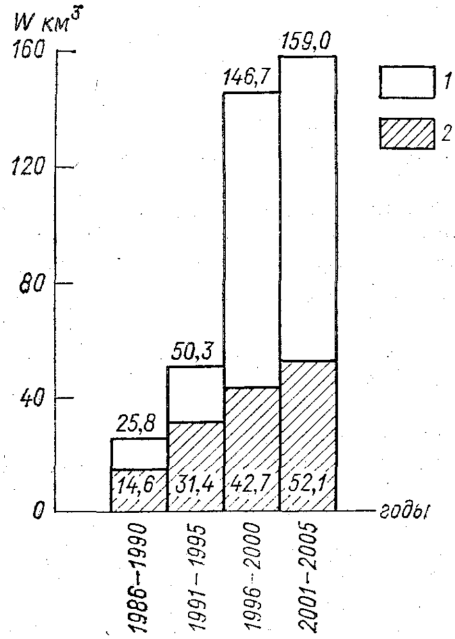


Рис. 7.5. Приращение полного (*1*) и полезного (*2*) объемов водохранилищ объемом боле 0,1 км³.

странах доля мертвого объема строящихся водохранилищ не превышает 20 % [54].

Таблица 7.2

Планируемое приращение нормативных водных ресурсов водохранилищ в бассейнах крупных рек СССР до 2005 г.

Бассейн реки	Нормативные водные ресурсы на конец периода W_i км³					Норма стока $\bar{Q}$ км³/год	$\beta = \frac{W_{2005}}{\bar{Q}} 100$ %
	1981—85 гг.	1986—90 гг.	1991—95 гг.	1996—2000 гг.	2001—2005 гг.		
Енисей	368,8	368,9	378,8	450,7	522,9	564	93
Волга	190,1	193,5	194,6	194,6	194,6	254	77
Обь	64,8	64,8	76,5	87,9	90,5	397	23
Амур	68,8	68,8	91,3	105,9	143,4	306	47
Сырдарья	35,5	36,5	37,0	42,2	42,2	37,0	114
Днепр	47,4	47,4	48,3	48,3	48,3	53,4	90
Лена	36,2	36,2	37,3	65,3	90,3	535	17
Дон	31,4	31,5	31,5	31,5	31,5	28,8	109
Кура	20,3	23,6	23,7	26,1	28,2	28,3	100
Амударья	15,7	15,8	15,8	18,1	35,7	69,5	51
Или	28,3	28,3	28,3	28,3	29,1	18,1	161
Урал	4,9	4,9	5,1	6,7	6,7	11,4	59
Кубань	4,4	4,4	4,4	4,4	4,6	14,2	32

К началу следующего столетия полный объем (нормативные водные ресурсы) всех водохранилищ СССР достигнет 30 % по сравнению с суммарным стоком рек, а полезный объем — 13 %. Данные показатели в целом по стране достаточно скромные. Однако для отдельных речных бассейнов, особенно расположенных в южных районах, значения этих показателей существенно больше. Так, например, в бассейнах рек Кубани, Оби, Амура и Лены нормативные водные ресурсы водохранилищ к 2005 г. составят 17...47 % нормы годового стока. Для бассейнов Урала и Амударьи этот показатель составит более 50 %. А в бассейнах Сырдарьи, Куры и Енисея к началу следующего века суммарный полезный объем всех водохранилищ будет равен объему годового стока (табл. 7.2). Наиболее интенсивно в предстоящие 15 лет будут строить крупные водохранилища в Сибири и на Дальнем Востоке в бассейнах рек Оби, Енисея, Лены и Амура. Здесь предполагают соорудить крупнейшие водохранилища, прежде всего энергетического назначения — Осиновское и Среднеенисейское на Енисее, Богучанское на Ангаре, Мокское на Витиме, каждое из которых будет иметь полный объем, превышающий 50 км^3 воды.

ЧАСТЬ IV. ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕК

Как было отмечено в гл. 2, водные ресурсы изменяются в основном при сооружении речных водохранилищ, когда дополнительно затапливаются большие массивы прилегающих земель. Для озерных водохранилищ, создаваемых путем подпора озер, изменения водных ресурсов незначительные, и ими, как правило, пренебрегают. Различают временные и постоянные изменения водных ресурсов, связанные с созданием и эксплуатацией водохранилищ.

Временными изменениями считают те, которые имеют место лишь в отдельные периоды строительства и эксплуатации водохранилищ. Основные виды временных изменений водных ресурсов: накопление воды в мертвых объемах водохранилищ в период их заполнения и пополнение запасов подземных вод. Кроме того, в водохранилищах многолетнего и сезонного регулирования, расположенных в зоне умеренного климата, в период их зимней сработки имеют место временные потери воды за счет оседания льда и покрывающего его снега на берегах водохранилища.

Эти потери практически никак не влияют на годовой сток рек. Весной они компенсируются при поступлении в водохранилище с берегов льда и покрывающего его снега при весеннем подъеме уровня воды. Изменения запасов воды в водохранилище, связанные с этими явлениями, оценивают при расчетах водного баланса крупных равнинных водохранилищ умеренной зоны за месячные и более короткие интервалы времени. Методика оценки этих составляющих водного баланса общеизвестна [52, 131]. Надо отметить, что они не превышают 2 % месячных значений приходной или расходной частей водного баланса. В то же время суммарные потери на оседание льда зимой или объемы дополнительного поступления воды со всплывшим и тающим льдом весной для водохранилищ Сибири и севера европейской части СССР сопоставимы с годовыми суммами осадков, поступающих на их поверхность (см. п. 9.1).

К постоянным относят изменения водных ресурсов, связанные с дополнительным испарением с водной поверхности зон затопления, и подтопленных прилегающих к водохранилищу земель, и с изменением режима заливаемости на нижележащем участке реки. В последнем случае за счет снижения размеров площадей, затапливаемых в естественных условиях в долине реки и в дельтовых участках рек, при регулировании стока несколько компен-

сируются затраты воды за счет снижения испарения с указанных зон. Выполненные оценки показали, что размеры такой компенсации за счет некоторого уменьшения разливов рек ниже гидроузлов в период весеннего половодья даже в бассейнах крупных рек не превышают 0,1 км³/год и ими можно пренебречь. Более существенная компенсация происходит за счет снижения площадей разливов в дельтовых участках крупных южных рек под влиянием водохранилища.

Выполненные расчеты показали, что такая компенсация для р. Амударьи составляет 2—3 км³/год. Для р. Волги она составляет около 1,5 км³/год. Для остальных крупных южных рек, имеющих дельты (Терек, Кубань, Сырдарья), она значительно ниже. На уровень 1985 г. суммарные размеры компенсации за счет указанных факторов для всех крупных водохранилищ СССР приняты равными 5 км³/год.

ГЛАВА 8. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕЧНОЙ СТОК

8.1. Методы оценки временных изменений стока при создании водохранилищ

8.1.1. Заполнение мертвого объема водохранилищ

Объем воды, идущий на заполнение мертвого объема водохранилища, зависит от морфологических особенностей чаши и высотного положения отметки уровня мертвого объема (УМО), которую назначают исходя из задач регулирования стока. На водохранилищах гидроэлектростанций отметка УМО соответствует максимально допустимой глубине сработки полезного объема при условии сохранения напора, необходимого для выработки электроэнергии. Для водохранилищ оросительного, рыбохозяйственного, навигационного и другого назначения отметку УМО назначают исходя из условий оптимального регулирования стока для нужд основных потребителей. Затраты воды на заполнение мертвого объема водохранилища нетрудно оценить при наличии кривой объемов и данных о средних уровнях воды на начало и конец расчетного периода. Такие оценки производят для водохранилищ речного типа. Что касается водохранилищ озерного типа, образованных в результате подпора озер, то в этом случае речной сток расходуется лишь на создание дополнительного регулирующего объема выше отметки УМО. Выполненные автором оценки затрат воды на заполнение мертвого объема крупных водохранилищ СССР приведены в п. 9.1.

8.1.2. Пополнение запасов подземных вод

Временные изменения стока, связанные с пополнением запасов подземных вод, включают фильтрационные потери на насыщение дна и берегов водохранилищ. Потери на насыщение грунтов дна происходят в период заполнения водохранилища и прекращаются спустя непродолжительное время (несколько суток или недель) после его окончания. Обычно для вычисления этих потерь используют следующую зависимость [158]:

$$W_д = F_з H_л \mu_л, \tag{8.1}$$

где $F_з$ — площадь затопления; $H_л$ — средняя мощность зоны аэрации ложа водохранилища до его сооружения, м; $\mu_л$ — недостаток насыщения грунта (коэффициент водоотдачи).

Использовать в расчетах всю площадь затопления $F_з$ некорректно, так как она включает в себя и горизонтальную проекцию береговой области водохранилища, в которую происходит береговая фильтрация и которая входит в расчет при оценке фильтрационного потока в берега водохранилища. В связи с этим при расчетах по формуле (8.1) возможно завышение значений $W_д$ в 2 раза и более. При определении потерь воды в дно водохранилища в правой части формулы (8.1) вместо $F_з$ принимали его площадь при УМО, включающую в себя в естественных условиях и часть долины, затопленной водохранилищем.

Следует отметить, что выполненный детальный анализ наличия данных о коэффициентах водоотдачи грунтов ложа крупных водохранилищ показал, что такие материалы во многих случаях полностью отсутствуют даже для равнинных водохранилищ, не говоря уже о горных. Поэтому удалось выполнить такие расчеты лишь для некоторых водохранилищ, по которым оказалось возможным собрать соответствующие данные. Для тех водохранилищ, для которых эти данные отсутствовали, оценки заимствованы из литературных источников.

Фильтрация в берега водохранилища может происходить в течение всего периода его эксплуатации. Однако больших значений она достигает с начала наполнения водохранилища до наступления установившегося режима грунтовых вод. Продолжительность этого периода для крупных равнинных водохранилищ по различным оценкам составляет 7...15 лет, а в отдельных случаях и более [63, 151].

Применяемые в настоящее время методические приемы оценки фильтрации в береговую зону водохранилищ требуют разнообразной гидрогеологической информации, которая в большинстве случаев отсутствует. Особенно ограниченны такие сведения при выполнении расчетов для проектируемых водохранилищ. Наиболее надежные данные об объемах фильтрации воды в береговую зону водохранилищ получены к настоящему времени при проведении полевых изысканий непосредственно в береговой зоне ряда эксплуатируемых водохранилищ. В основном такие исследования

выполнены для ряда водохранилищ Волжского и Днепровского каскадов [120]. Что касается использования различных теоретических приемов или эмпирических схем [18, 49, 151], то их применение в силу ограниченности исходной гидрогеологической информации и ряда других причин не позволяет получить надежные результаты. Анализ данных фактических наблюдений показал, что расчетные оценки развития подпора подземных вод в береговой зоне водохранилищ могут весьма значительно (на 80 % и более) отличаться от натурных [82]. При таком положении дел совершенно очевидна необходимость разработки простых, теоретически обоснованных и достаточно надежных методик оценки объема фильтрации вод в береговую зону водохранилища. Один из таких подходов основан на использовании полученных С. В. Завилейским результатов моделирования процесса геофильтрации на электроаналоговых моделирующих установках ЭЛИН-ГГИ [81—83].

8.1.2.1. Предлагаемая методика оценки объема фильтрационных вод в береговую зону водохранилищ

Методика разработана для крупных равнинных водохранилищ. Как известно, при создании водохранилищ резко изменяется характер водообмена между поверхностными и подземными водами. В период заполнения водохранилища в его береговой зоне появляется так называемая депрессионная воронка, ограниченная с одной стороны положением уровня воды в водохранилище, а с другой — положением поверхности водоносного горизонта, максимальные отметки которой находятся на водоразделе. Воронка заполняется за счет инфильтрации воды из водохранилища, притока подземных вод с водосбора и просачивания атмосферных осадков.

При создании расчетной методики принято во внимание, что инфильтрация происходит в ненасыщенную зону пород, слагающих берега водохранилища, ограниченную снизу поверхностью грунтовых вод. В качестве основной расчетной зависимости для оценки положения депрессионной поверхности водоносного горизонта рассмотрено следующее выражение [80]:

$$h_X = \sqrt{h_р^2 + (W/K_ф)(2L - X)X}, \qquad (8.2)$$

где h_X — уровень подземных вод на расчетном расстоянии X от уреза водоема, м; $h_р$ — уровень подземных вод y уреза водоема, м; $K_ф$ — коэффициент фильтрации водоносных пород, м/сут; L — расстояние от уреза водоема до водораздела, м; W — интенсивность инфильтрации атмосферных осадков, м/сут.

В целях получения универсальной расчетной зависимости принята единая горизонтальная плоскость отсчета перепадов уровней грунтовых вод, которая проходит через среднюю многолетнюю отметку положения исходного горизонта воды в водотоке до наполнения водохранилища. Схема геофильтрации для этого случая изображена на рис. 8.1. Как видно из рисунка, можно принять

$\Delta h_X/\Delta H = X/L$, и тогда с учетом, что $h_X = \Delta h_X + h_р$, уравнение (8.2) можно представить в безразмерном виде

$$\Delta h^*_X = \sqrt{(h_р/\Delta H)^2 + [(W/K_ф)(2L - X)](x/L)} - h_р/\Delta H, \quad (8.3)$$

где $\Delta h^*_X = \Delta h_X/\Delta H$.

При условии, что $W/K_ф = \nu$, и после некоторых преобразований получено окончательное расчетное выражение:

$$\Delta h^*_X = \sqrt{(h_р/\Delta H)^2 + \nu(2L - X)(X/L)} - h_р/\Delta H. \quad (8.4)$$

Значения безразмерного коэффициента ν определены для каждого конкретного расчетного участка по зависимости:

$$\nu = 1 + 2h_р/\Delta H, \quad (8.5)$$

которую выводят из уравнения (8.4) при условии, что $\Delta h_X/\Delta H = X/L = 1$. Таким образом, расчет отметок депрессионной поверх-

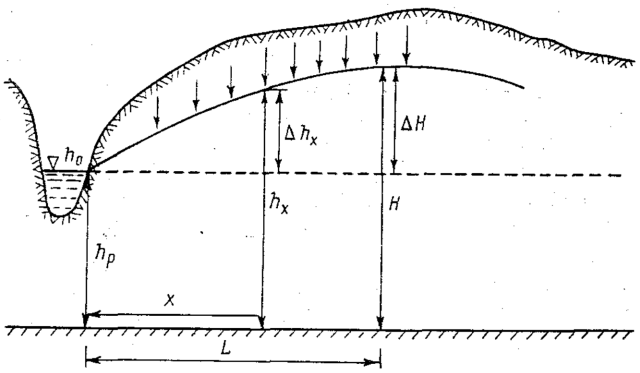


Рис. 8.1. Схема геофильтрации в районе водохранилища.

ности в пределах от уреза водохранилища до водораздела по зависимостям (8.4) и (8.5) можно выполнить без учета интенсивности инфильтрационного питания W и коэффициента фильтрации пород, слагающих водоносный горизонт, $K_ф$. Это важное обстоятельство облегчило разработку расчетной схемы.

Использованы количественные результаты моделирования режима подземных вод, полученные С. В. Завилейским. На моделях воспроизведен естественный режим геофильтрации на участке от водотока до водораздела и изучены закономерности формирования депрессионной воронки в береговой зоне водохранилища. Результаты моделирования приведены на рис. 8.2. Кривая *1* характеризует положение депрессионной поверхности водоносного горизонта до развития подпора. Кривые *2—4* отражают положение поверхности депрессионной воронки на отдельных стадиях развития процесса при разнонаправленных потоках речных ($q_п$) и подземных ($q_н$) вод, расходуемых на заполнение воронки. Кривая *5* отражает положение депрессионной поверхности в тот момент, когда имев-

шая место фильтрация воды из водохранилища в его берега прекращается ($q_п = 0$). При этом следует иметь в виду, что процесс развития подпора подземных вод в сторону водораздела может продолжаться достаточно долго [82]. Кривая *6* соответствует стадии возобновления подземного питания водохранилища. На кривых *2—5* точки d_1, d_2, d_3 и d характеризуют минимальные отметки уровней подземных вод на поверхности депрессионной воронки в различные периоды ее трансформации. Кривая *bd*, огибающая эти

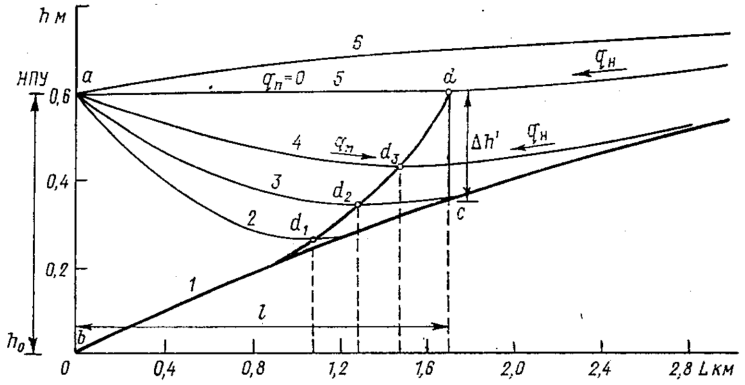


Рис. 8.2. Формирование зоны аккумуляции подземных вод в береговой зоне водохранилища.

1 — положение поверхности подземных вод (кривая депрессии) до создания водохранилища, *2—5* — положение поверхности подземных вод на различных стадиях заполнения депрессионной воронки, *6* — положение поверхности подземных вод после прекращения инфильтрации воды из водохранилища, d_1—d_3 и d — минимальные отметки поверхности депрессионной воронки, *l* — ширина зоны проникновения грунтового потока в берег водохранилища.

точки, является гидродинамической границей раздела потоков подземных вод, поступающих в депрессионную воронку со стороны водохранилища и со стороны водораздела. Для облегчения расчетов фигура *abd* апроксимирована трапецией *abcd*, то есть за границу раздела фильтрационных потоков принят перпендикуляр *dc* ($\Delta h'$), опущенный из точки *d* до пересечения с первоначальной кривой депрессии.

На основании теоретических зависимостей (8.4) и (8.5) и результатов моделирования, автор совместно с С. В. Завилейским построил универсальные графики, позволяющие рассчитывать продолжительность периода, в течение которого пополняются запасы грунтовых вод, а также площади проекции зон аккумуляции подземных вод в береговой зоне водохранилища (для различных интервалов времени) на вертикальную плоскость (F_i) (на рис. 8.2 контур *abcd*). На рис. 8.3 приведены графики зависимостей безразмерных коэффициентов β и γ от α, которые характеризуются следующими соотношениями:

$$\alpha = \Delta h_р/\Delta H, \quad \beta = l/L, \quad \gamma = \Delta h'/\Delta H,$$

где $\Delta h_р$ и ΔH — перепады уровня подземных вод у уреза водохранилища и на водоразделе над отметкой уреза воды в реке до начала заполнения водохранилища; l — горизонтальное расстояние от уреза водохранилища до гидродинамической границы раздела двух фильтрационных потоков (см. рис. 8.2).

Графики, приведенные на рис. 8.3, проверены по данным натурных наблюдений за процессом формирования подпора подземных вод в береговой зоне различных водохранилищ СССР, которые подтвердили их надежность. С учетом указанных обстоятельств, предлагаемая методика оценки потерь воды на фильтрацию в береговую зону водохранилищ заключается в следующем.

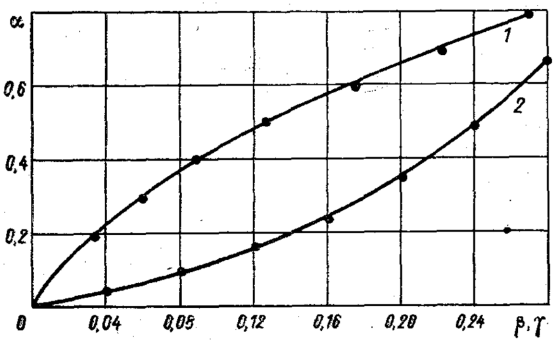


Рис. 8.3. Зависимость коэффициентов β (*1*) и γ (*2*) от коэффициента α.

Сначала расчет ведут по отдельным поперечникам, на которые разбивают береговую зону водохранилища. На основании данных о превышении отметок поверхности воды в водохранилище Δh_x и подземных вод на водоразделе ΔH над отметкой уровня воды в водотоке рассчитывают коэффициент $\alpha = \Delta h_x / \Delta H$ и затем с графика снимают (см. рис. 8.3) значения коэффициентов β и γ. После этого вычисляют площадь проекции зоны аккумуляции подземных вод на вертикальную плоскость (на рис. 8.2 фигура *abcd*) по зависимости

$$F = \Delta H\,[(\alpha + \gamma)\,\beta/2]\,L. \qquad (8.6)$$

Для того чтобы получить данные об объемах воды, поступающих в берега водохранилища, береговую область разбивают на ряд блоков, охватывающих участки от уреза водотока до водораздела. В качестве отдельных блоков принимают участки территории, сравнительно однородные по гидрогеологическим условиям. Блоки выделяют исходя из предположения, что первый от поверхности водоносный безнапорный горизонт гидравлически связан с водохранилищем вдоль всей береговой полосы.

Данные о глубине залегания подземных вод на водоразделе, которые необходимы для расчета ΔH, снимают с обзорных гидрогеологических карт. Расстояния от уреза водохранилища до водо-

раздела L и ширину блоков B определяют по топографическим картам.

Объем фильтрационных потерь определяют для каждого расчетного i-го блока по формуле

$$V_i = F_i B_i \mu_i, \tag{8.7}$$

где μ_i — коэффициент недостатка насыщения почвогрунта.

Суммарный объем потерь речного стока на инфильтрацию в берега водохранилища определяют по формуле

$$\sum_{i=1}^{n} V_i = \sum_{i=1}^{n} F_i B_i \mu_i, \tag{8.8}$$

где n — число блоков.

Горизонтальное расстояние l, на которое распространяется фильтрационный поток из водохранилища, оценивают по формуле

$$l = \beta L. \tag{8.9}$$

Разработанный метод применен для количественной оценки объемов потерь речного стока на инфильтрацию в береговую зону крупных водохранилищ СССР. В качестве примера в табл. 8.1

Таблица 8.1

Расчет потерь речного стока на фильтрацию воды в береговую зону Куйбышевского водохранилища

№ расчетного блока	Исходные данные					Расчетные данные					
	L км	B км	Δh м	ΔH м	μ	α	β	γ	F км^2	V км^3	l км
I	46	70	28,0	65,0	0,2	0,43	0,1	0,221	97 324	1,362	4,60
II	60	150	16,0	103,0	0,2	0,16	0,025	0,118	21 475	0,644	1,50
III	40	130	10,0	106,0	0,2	0,09	0,013	0,078	4 630	0,120	0,52
IV	115	150	8,5	105,0	0,2	0,08	0,011	0,066	9 696	0,290	1,265

$\sum V = 2{,}416$ км^3

Таблица 8.2

Сравнительные данные по оценке затрат воды на насыщение береговой зоны ряда крупных водохранилищ СССР разными методами

Водохранилище	Полный объем, км^3	Потери воды на насыщение береговой зоны водохранилищ, км^3	
		расчет на основе детальных гидрологических данных	расчет по предложенной методике
Волгоградское	31,5	2,70	1,67
Горьковское	8,8	0,35	0,32
Днепродзержинское	2,5	0,70	0,41
Кременчугское	13,5	0,60	0,65
Куйбышевское	58,0	6,08	2,42

приведены результаты расчета по данной методике потерь речного стока в береговую зону Куйбышевского водохранилища, а в табл. 8.2 — сравнительные данные по затратам воды на насыщение береговой зоны ряда крупных водохранилищ, рассчитанные по результатам детальных гидрогеологических исследований и по предложенному методу.

8.2. Методы оценки постоянных изменений стока рек при создании водохранилищ

Постоянные изменения водных ресурсов реки после создания водохранилища связаны с изменением соотношений между элементами водообмена в системе водохранилище—речной бассейн. Основные уравнения взаимосвязи элементов водообмена для указанной системы приведены в части I. Они являются основой для разработки расчетных методов оценки изменений водных ресурсов реки для трех характерных зон речного бассейна. Эти изменения имеют место при сооружении речных водохранилищ, когда затапливаются большие площади суши.

8.2.1. Методика оценки потерь воды с зоны затопления

Наибольшее применение для оценки потерь воды с зоны затопления водохранилища за год имеет методика, разработанная И. А. Шикломановым и Г. М. Веретенниковой [158]. Основная расчетная формула, предложенная ими, следующая:

$$u = 10^{-6}(z'_{в} - x'_{в} + y'_{з})f\alpha, \tag{8.10}$$

где u — объем потерь воды с зоны затопления, км^3; $x'_{в}$ — осадки на поверхность водохранилища, мм; $y'_{з}$ — сток, который сформировался бы в пределах суши, затопленной ныне водохранилищем, мм; $z'_{в}$ — испарение с водной поверхности водохранилища, мм; f — площадь поверхности водохранилища, км^2; $\alpha = f_{з}/f$ — коэффициент затопления, где $f_{з}$ — площадь суши, затопленной водохранилищем.

Автор предложил общее решение, позволяющее оценивать потери воды с зоны затопления за любой интервал времени [57]. Как известно, изменения объемов стока после создания водохранилища в общем виде оценивают следующим соотношением:

$$u = y_{с} - y_{в}, \tag{8.11}$$

где величина $y_{с}$ характеризует естественный сток с территории в границах будущего водохранилища, который включает в себя сток, сформированный в русловой сети $y_{р.с}$, и сток, сформированный в пределах суши, отводящейся под затопление $y_{з}$: $y_{с} = y_{р.с} + y_{з}$.

Величину $y_{р.с}$ оценивают по разности осадков, выпавших на водную поверхность реки $x_{р.с}$ и испарения с нее $z_{р.с}$ с учетом эф-

фекта руслового регулирования, приводящего к увеличению или уменьшению запасов воды в русловой сети [1]:

$$y_{р.\,с} = x_{р.\,с} - z_{р.\,с} \pm q. \qquad (8.12)$$

Величину q, характеризующую изменение запасов воды в русловой сети, принимают со знаком минус для стадии накопления запасов воды.

Второе слагамое правой части уравнения (8.11) характеризует сток, формирующийся в пределах водохранилища. Его определяют по формуле

$$y_в = x_в - z_в - \rho, \qquad (8.13)$$

где $x_в$ — осадки на зеркало водохранилища; $z_в$ — испарение с водной поверхности; ρ — изменение запасов воды, связанное с поступлением подземных вод в водохранилище или с расходованием вод водохранилища на пополнение запасов подземных вод.

Величину ρ для эксплуатируемых водохранилищ при установившемся режиме подземных вод в большинстве случаев можно приравнять к нулю (если отсутствует постоянный подземный отток воды из водохранилища за пределы водосбора). Эта составляющая имеет значение лишь для периода заполнения, когда повышается уровень грунтовых вод в районе сооружаемого водохранилища. По этой причине в уравнении (8.13) перед этой составляющей стоит знак минус. Во всех остальных случаях (исключая период заполнения) ее можно не учитывать. После ряда преобразований формула (8.11) принимает следующий вид:

$$u = z'_в f - x'_в f + x'_{р.\,с} f_{р.\,с} - z'_{р.\,с} f_{р.\,с} + y'_з f_з \pm q' f_{р.\,с}, \qquad (8.14)$$

где $f_{р.\,с}$ — площадь водной поверхности реки; $z'_в$, $x'_в$, $y'_з$, $x'_{р.\,с}$, $z'_{р.\,с}$ и q' выражены в миллиметрах слоя воды.

Допуская, что слои испарения с поверхности водохранилища и поверхности реки и слой осадков на эти поверхности равны между собой (т. е. $z'_в = z'_{р.\,с}$ и $x'_в = x'_{р.\,с}$), получают следующее выражение [2]:

$$u = (z'_в - x'_в + y'_з) f\alpha \pm q^0 f_{р.\,с}. \qquad (8.15)$$

Для $y'_з$ можно записать формулу

$$y'_з = x'_с - z'_с \pm b', \qquad (8.16)$$

---

[1] Строго говоря, при интенсивном притоке в русло реки вод из глубоких подземных горизонтов их поступление также необходимо учитывать при определении $y_{р.\,с}$. Однако в большинстве случаев это явление не имеет места, и в дальнейших расчетах его не учитывают.

[2] Строго говоря, это допущение соблюдается не всегда, так как испарение с водохранилища и с водной поверхности реки при одинаковых гидрометеорологических условиях может различаться за счет возможных расхождений в температуре поверхности воды. Для достаточно продолжительных интервалов времени (год, месяц) эти расхождения не приводят к существенным различиям в значениях испарения.

где $x'_с$ — слой осадков; $z'_с$ — слой испарения с суши; b' — параметр, характеризующий изменение запасов влаги на поверхности и в зоне аэрации.

Знак минус перед параметром b' означает увеличение запасов влаги. С учетом формулы (8.16) и того, что $x'_в = x'_с$, выражение (8.15) можно представить в следующем виде:

$$u = (z'_в - z'_с + b')f\alpha \pm q'f_{р.с}. \qquad (8.17)$$

Уравнения (8.15) и (8.17) позволяют рассчитывать естественные изменения речного стока, связанные с созданием водохранилищ. Однако необходимо также учитывать фактор искусственного регулирования. В этом случае суммарные (естественные и искусственные) изменения речного стока в створе замыкающего гидротехнического сооружения оценивают следующими формулами:

$$u = (z'_в - x'_в + y'_з)f\alpha \pm q'f_{р.с} + cf, \qquad (8.18)$$

$$u = (z'_в - z'_с \pm b')f\alpha \pm q'f_{р.с} \pm ef, \qquad (8.19)$$

где cf — изменение объема водной массы водохранилища за счет искусственного регулирования, причем положительные значения этой составляющей характеризуют сработку запасов воды в водохранилище.

Формулы (8.18) и (8.19) позволяют учитывать суммарные изменения речного стока за любой интервал времени. Применительно к годовому интервалу времени для водохранилищ, в которых изменение объема водной массы $cf = 0$, зависимости (8.18) и (8.19) упрощают, и они характеризуют уменьшение речного стока, связанное с дополнительным испарением с водной поверхности водохранилища (потери на дополнительное испарение). Формулу (8.18) приводят к виду (8.10), а формулу (8.19) — к виду:

$$u = (z'_в - z'_с)f\alpha. \qquad (8.20)$$

При детальных расчетах потерь воды с зон затопления ряда крупных водохранилищ СССР за месячные интервалы времени использована формула (8.19). При расчетах годовых потерь с водохранилищ, для которых на протяжении многих лет составляют водные балансы, использована формула (8.10). В остальных случаях предпочтение отдано формуле (8.20), имеющей более простую структуру по сравнению с формулой (8.19) и меньшее число неизвестных членов. Отдельные расчетные параметры этих формул при оценке потерь стока с зон затопления эксплуатируемых водохранилищ определены следующим образом.

Значения испарения с водной поверхности $z'_в$ непосредственно приняты из материалов по водным балансам водохранилищ, которые опубликованы в Материалах наблюдений на озерах и водохранилищах. При отсутствии таких данных значения $z'_в$ рассчитаны по предложенной методике (см. п. 3.4.2) или по формуле ГГИ с использованием фактических данных наблюдений за гидро-

метеорологическими элементами в районе водоема и на его акватории. Данные о выпадении осадков на поверхность водохранилища $x'_в$ получены либо из материалов по водным балансам водохранилища, либо определены по фактическим наблюдениям за осадками в районе рассматриваемого водоема. При определении годовых значений слоя естественного стока $y'_з$ применен предложенный прием, основанный на использовании данных по водным балансам водохранилищ. Расчет $y'_з$ выполнен по следующей зависимости [57]:

$$y'_з = W_{б.п}/f_{б.п}, \tag{8.21}$$

где $W_{б.п}$ — объем бокового притока к водохранилищу; $f_{б.п}$ — площадь, на которой формируется боковой приток.

Значение $f_{б.п}$ определено по разности площадей бассейна водохранилища и водосбора реки до входного створа, по которому определяют основной приток. При отсутствии данных по водным балансам значения $y'_з$ определены с использованием метода аналогии.

Слой суммарного испарения с поверхности затопленной суши $z'_с$ определен в соответствии с Указаниями [150] с использованием фактических данных наблюдений за гидрометеорологическими элементами, входящими в расчетные схемы. Согласно исследованиям, хорошие результаты дает применение для расчета годовых значений $z'_с$ уравнения связи М. И. Будыко [125]. При расчетах месячных изменений речного стока по формуле (8.19) для определения $z_с$ и b' использован комплексный метод [40].

Значения q' рассчитаны по соотношению $q' = \Delta h$, где изменение уровня воды в реке $\Delta h = (\Delta h_н - \Delta h_в/2$. При этом изменения уровней в верхнем $\Delta h_в$ и нижнем $\Delta h_н$ створах за расчетный интервал времени определены по графикам связи $Q = \varphi(h_в)$ и $h_н = \gamma(h_в)$, построенным за период до создания водохранилища. Значения площадей русла в естественных условиях ($f_{р.с}$) определены в зависимости от коэффициента затопления α. При расчетах за месячные интервалы времени коэффициент α определен графически с использованием кривой объемов. Предложенный прием графического определения коэффициента подробно изложен в работе [57]. При расчетах потерь за годовой период значения коэффициента α приняты приближенными с использованием установленной зависимости $\alpha = f(K)$, где K — коэффициент, равный частному от деления длины водохранилища на его ширину. При $K \leqslant 25$ $\alpha \approx 0{,}95$; при $K = 26 - 50$ $\alpha \approx 0{,}88$; при $K = 51 - 75$ $\alpha \approx 0{,}75$; при $K < 75$ $\alpha \approx 0{,}70$. Для оценки аккумуляционной составляющей c в формуле (8.19) использованы материалы по водным балансам водохранилищ. При их отсутствии значения этого параметра определены по данным об изменениях среднего уровня водоема за расчетный интервал времени с использованием кривой объемов.

8.2.2. Методика оценки изменений водных ресурсов, связанных с подтоплением прилегающих к водохранилищу земель

Потери воды с зон подтопления $u_{пдт}$ определяют по известной зависимости [156]:

$$u_{пдт} = 10^{-6}(z'_{в} - z'_{п.с})f_{пдт}, \qquad (8.22)$$

где $z'_{п.с}$ — испарение с подтопленнных участков суши, мм; $f_{пдт}$ — площадь подтопленной зоны.

Как отмечено в работе [156], параметр $z'_{п.с}$ в формуле (8.22) представляет собой по существу испарение грунтовых вод. Пред-

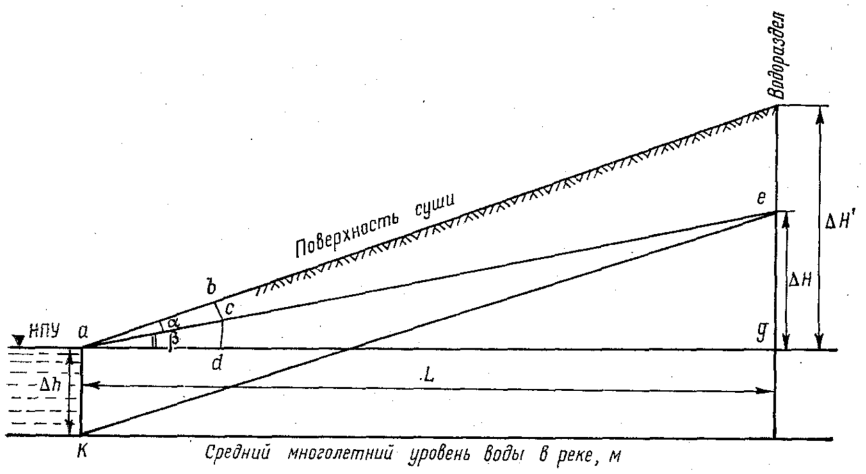


Рис. 8.4. Схема, использованная при выводе уравнения (8.23), для определения границы зоны подтопления.

ложенная в указанной работе расчетная схема для определения $z'_{п.с}$ включает в себя ряд трудноопределяемых параметров, получена на региональном материале и использовать ее для массовых расчетов довольно трудно. В расчетах для районов недостаточного увлажнения $z'_{п.с}$ принято равным 90 % испарения с водной поверхности, а для районов достаточного увлажнения — равным испарению с водной поверхности.

В качестве зон подтопления приняты площади побережья водохранилищ с глубиной залегания грунтовых вод не ниже 1 м от поверхности земли. Границы этих площадей при детальных расчетах потерь с зон подтопления определены по тем же блокам, которые использованы при расчетах фильтрационных потерь в береговую зону водохранилищ (п. 8.1.2.1). Для оценки расстояния x от уреза водохранилища до границы зоны подтопления использована разработанная расчетная зависимость

$$X = (L^2 + \Delta H\,\Delta H')/[L(\Delta H' - \Delta H)]. \qquad (8.23)$$

Все параметры, входящие в формулу (8.23), обозначены на схеме (рис. 8.4). Их значения при подстановке в формулу выражают в метрах. Отрезок *ab* представляет собой расстояние *X*. Линии *Ke* и *ae* характеризуют положение уровней залегания грунтовых вод до и после заполнения водохранилища. С учетом полученных расстояний до границы зоны подтопления определены подтопленные площади для отдельных расчетных блоков.

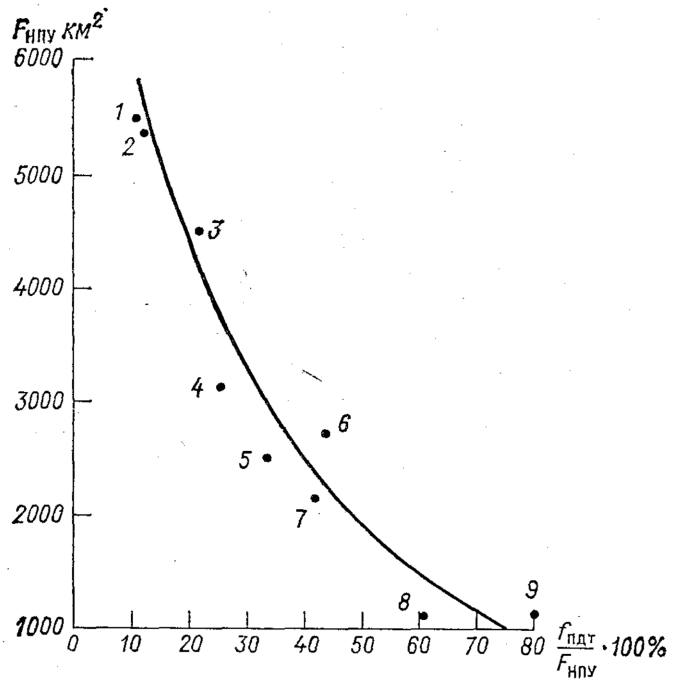


Рис. 8.5. Зависимость площади подтопления от площади поверхности водохранилища при НПУ.

1—9 — водохранилища: Куйбышевское, Братское, Рыбинское, Волгоградское, Кременчугское, Цимлянское, Каховское, Новосибирское, Воткинское.

При расчетах изменений водных ресурсов по упрощенной схеме площадь зоны подтопления определена по составленному графику в зависимости от площади водной поверхности водохранилища при НПУ (рис. 8.5).

8.3. Методика оценки изменений речного стока при проектировании водохранилищ

Методика расчета изменений речного стока при проектировании водохранилищ разработана автором в 1981 г. и вошла в нормативный документ [131]. Основные положения этой методики изложены далее.

На стадии проектных проработок изменения речного стока за счет создания водохранилищ рассчитывают с использованием в качестве исходной информации норм гидрометеорологических элементов [1]. При этом в зависимости от объекта проектирования расчеты можно производить либо для нормального подпорного уровня (НПУ), либо для уровня, изменяющегося в течение года в соответствии с принятым по проекту характером регулирования стока.

При расчетах для годового периода как в первом, так и во втором случае используют зависимости (8.10) или (8.20). Если изменения стока оценивают для месячных интервалов времени, в первом случае (при постоянном НПУ) расчет производят по зависимостям (8.18) и (8.19), исключая последний член правой части уравнений (*cf*). Для второго случая эти зависимости используют в полном написании. Приемы определения отдельных составляющих, входящих в эти формулы, при проектировании следующие.

Слой испарения с водной поверхности проектируемого водоема $z'_в$ определяют в соответствии с Указаниями [150]. В качестве исходной информации используют данные гидрометеорологических наблюдений в районе будущего водохранилища или материалы специализированной водно-испарительной сети. В простейшем случае для приближенных оценок $z'_в$ можно использовать карту изолиний этого параметра, помещенную в Указаниях [150]. Слой осадков на водную поверхность будущего водохранилища $x'_в$ определяют по данным метеостанций, расположенных в рассматриваемом районе. Определение слоя естественного стока $y'_з$ с территории, которую отводят под водохранилище, — наиболее сложная задача. В связи с тем, что существующая гидрометрическая сеть не позволяет в большинстве случаев надежно оценить данный параметр, для его определения рекомендованы различные косвенные приемы. Один из них основан на использовании метода аналогии, когда за реки-аналоги принимают водотоки, равномерно расположенные в районе будущего водохранилища и имеющие средние (для рассматриваемой территории) площади водосбора. Определенные для этих рек модули стока осредняют и таким путем оценивают средние значения стока с территории будущего водохранилища. Однако для месячных интервалов времени этот метод может давать весьма значительные погрешности за счет большого разнообразия условий формирования стока в пределах даже отдельно взятого водохранилища. Помимо метода аналогии средние многолетние годовые значения естественного стока можно определить на основе региональных карт стока, опубликованных в монографиях «Ресур-

---

[1] Для повышения качества водохозяйственных проектов в экологическом, природоохранном и экономическом отношении необходимо перейти к расчетам гидрологических характеристик реконструируемого водного объекта не только по данным о средних многолетних значениях гидрометеорологических элементов, но и по данным о наблюдавшихся экстремальных гидрометеорологических ситуациях в районе предполагаемого гидростроительства, вызывающих серии маловодных лет или особенно многоводные годы. (*Прим. науч. ред.*)

сы поверхностных вод СССР», или более приближенно по карте стока, составленной в целом для территории СССР [55].

Средний многолетний годовой слой испарения с поверхности суши z'_c определяют с использованием методов, изложенных в Указаниях [125]. Исходной информацией для расчета могут служить данные наблюдений актинометрической и гидрометеорологической сети, а также материалы наблюдений стандартной почвенно-испарительной сети. При расчете среднемесячных изменений естественного стока по формуле (8.19) значения z'_c следует определять по комплексному методу, разработанному в ГГО [40]. Использование этого метода при наличии данных о средних многолетних значениях годового стока $y'_з$, месячных значений температуры воздуха, абсолютной влажности воздуха и осадков позволяет определять одновременно месячные нормы суммарного испарения с суши z'_c и изменение влагозапасов в почве b'. Следует подчеркнуть, что использование комплексного метода в большинстве случаев обеспечивает необходимую точность определения месячных значений z'_c и b' и позволяет осуществить расчеты при проектировании водохранилищ по формуле (8.19). Составляющую q', которая характеризует изменение запасов воды в речной сети, для периодов с устойчивым стоком и рек с зарегулированным режимом стока можно не рассчитывать из-за ее малого значения. Для периодов половодий и паводков при оценке параметра q' по формуле (8.19) можно использовать соотношение $q' = \Delta h$, где изменение уровня воды в реке $\Delta h = (\Delta h_н - \Delta h_в)/2$, при этом $\Delta h_в$ и $\Delta h_н$ — средние за расчетный период изменения уровня на верхнем (входном) и нижнем (замыкающем водохранилище) створах. Площадь территории, которую затапливают при создании водохранилища, равна $f_з = f - f_{р.с}$. Для ее определения достаточно знать площадь водной поверхности водохранилища f и оценить среднюю площадь русловой сети $f_{р.с}$ за рассматриваемые интервалы времени. Значение $f_{р.с}$ можно определить по картографическим материалам с использованием кривой площадей водохранилища. По этим данным для затапливаемой речной сети каждого водохранилища можно построить график зависимости $f_{р.с} = \varphi(Q)$, где Q — приток по главной реке. Этот график в дальнейшем можно использовать при определении $f_{р.с}$ за конкретные периоды времени [157]. Кроме того, значение $f_{р.с}$ можно определить через коэффициент затопления α (см. п. 8.2.1).

Значение c определяют по проектным материалам как произведение среднего приращения (или сработки) уровня водохранилища за рассматриваемый период на среднюю площадь водной поверхности.

В табл. 8.3 приведены результаты расчетов месячных изменений речного стока по формуле (8.19), выполненных для условий, принятых при проектировании Красноярского водохранилища. Нижняя графа таблицы содержит данные о потерях стока за счет дополнительного испарения с поверхности Красноярского водохрани-

Таблица 8.3

Расчет изменений речного стока при проектировании Красноярского водохранилища

Расчетный параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
						Расчет по формуле (8.19)							
$(z_в - z_с)$ км^3	0	0	—0,01	—0,02	—0,04	—0,05	0,06	0,19	0,25	0,27	0,08	0	0,73
b км^3	0	0	0	—0,02	0,12	0,02	—0,04	—0,05	—0,02	—0,01	0	0	0
q км^3	0,01	0,01	—0,07	—0,46	—0,68	0,07	0,42	0,16	0,16	0,22	0,13	0,03	0
c км^3	4,7	5,08	4,38	—2,73	—11,23	—9,55	—2,59	—0,45	0,54	—0,28	7,29	4,84	0
u км^3	4,69	5,07	4,44	—2,27	—10,71	—9,69	—2,91	—0,37	0,64	—0,22	7,24	4,81	0,73
α	0,85	0,84	0,83	0,82	0,82	0,84	0,85	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	
						Проектные данные							
$z'_в$ мм	0	0	0	8	15	27	78	117	118	90	39	0	492
$z'_с$ мм	2	2	6	24	38	50	53	38	14	6	5	2	240
u км^3	0	0	—0,01	—0,03	—0,05	—0,06	0,07	0,22	0,29	0,31	0,09	0	0,83

лища по материалам проекта. Эти данные получены в результате расчета по формуле (8.20) при коэффициенте затопления $\alpha = 1$, то есть без учета меняющейся в естественных условиях площади водной поверхности реки, так как $\alpha = 1$ при $f_з = f$. Как видно из таблицы, потери стока за счет увеличения испарения с площади водного зеркала с учетом изменения площадей затопления оказались на 0,1 км³ меньше, чем рассчитанные по проекту. Для Красноярской ГЭС 0,1 км³ воды позволяет выработать $25 \cdot 10^6$ кВт·ч электроэнергии. Если принять стоимость 1 кВт·ч электроэнергии равной одной копейке, то экономический эффект, связанный с более точной оценкой потерь на испарение 0,1 км³ воды составит 250 000 руб [57].

ГЛАВА 9. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕЧНОЙ СТОК

На основании методик, изложенных в предыдущем разделе, оценены временные и постоянные изменения речного стока под влиянием водохранилищ на современном этапе и в перспективе до 2005 г. В зависимости от качества и надежности исходной гидрометеорологической и гидрологической информации, полноты проектных данных применены различные методические подходы к оценке временных и постоянных изменений речного стока при создании и эксплуатации отдельных водохранилищ. Итоговые оценки влияния на сток рек СССР крупных водохранилищ объемом более 1 км³ выполнены для 1985 г. и на перспективу до 2005 г.

Все приведенные в настоящем разделе оценки основаны на использовании обширного исходного материала, который включал в себя:

1) данные об основных параметрах и характеристиках всех существующих и проектируемых водохранилищ СССР с объемом более 10 млн м³;

2) материалы расчетов месячных и годовых водных балансов крупных водохранилищ СССР, составляемых учреждениями Госкомгидромета СССР.

3) гидрологические характеристики грунтов и береговой зоны водохранилищ, а также данные о глубине залегания грунтовых вод на водоразделах;

4) результаты паспортизации водохранилищ СССР, выполненной ЦНИИКИВРом;

5) перспективные данные о намечаемых к строительству крупных водохранилищах объемом более 100 млн м³ и их основные характеристики (по данным на 1987 г.).

9.1. Оценка временных изменений речного стока под влиянием водохранилищ

Как было отмечено в гл. 8, временные изменения стока рек связаны в основном с заполнением мертвого объема водохранилищ. В то же время в зимние месяцы часть воды теряется при

Таблица 9.1

Изменение объема воды в водохранилищах, связанное с особенностями их ледового режима (за характерные годы и периоды)

Водохранилище	Период наблюдений	Потери на оседание льда по месяцам, млн м³						Процент годовой суммы осадков	Поступление воды в водохранилище со всплывшим льдом по месяцам, млн м³				Процент годовой суммы осадков
		XI	XII	I	II	III	IV		III	IV	V	VI	
Серебрянское	1970—71		—2,30	—10,7	—14,3	—13,0	—15,1	35,0			22,9	32,5	35,0
	1971—72	—1,4	—5,6	—13,9	—17,1	—9,3	—3,8	47,0			24,8	26,3	47,0
	1970—80	—1,2	—3,4	—7,3	—10,2	—10,0	—10,6	33,0			25,0	16,4	31,8
Иваньковское	1952—53	—4,0	—10,0	—17,0	—8,0	—9,0		20,9		48,0			20,9
Вилюйское	1974—75	—41,8	—44,4	—44,7	—50,0	—39,9	—37,6	39,7			258		39,7
Шекснинское	1964—65	—8	—14	—41	—11	—19		10,2		93,0			10,2
	1965—66	—4	—8	—30	—47	—27		10,1		116			10,1
	1964—80	—3,6	—11,5	—23,4	—25,5	—8,4		7,8		57,3	13,8		7,6
Куйбышевское	1968—69	—0,1	—0,1	—0,3	—0,5	—0,2		0,05		1,2			0,05
Ириклинское	1963—64		—2,8	—6,1	—8,6	—4,3		31,2		21,8			31,1
Имандровское	1956—57	—3	—6	—10	—7	—19	—9	11,0			54,0		11,0
	1956—80	—2,3	—5,7	—8,7	—9,6	—12,4	—10,1	10,2			40,7	7,9	10,2

оседании льда на берегах водохранилищ, а весной в водохранилище со всплывшим льдом поступает дополнительная вода. Эти временные изменения объема воды в водохранилище небольшие и для крупных водохранилищ не превышают 1—2 % среднемесячных значений стока реки. Абсолютные значения этой составляющей приведены в табл. 9.1.

На заполнение мертвых объемов большинства крупных равнинных водохранилищ СССР речного типа расходуется, как правило, 5—10 % среднегодового стока реки (табл. 9.2). Учитывая, что для достижения отметки УМО на таких водохранилищах требуется в среднем 2—3 года, ежегодные потери стока, связанные с заполнением их мертвого объема, составляют 1—5 % годового стока реки в створе подпорного сооружения. Для крупных горных и предгорных водохранилищ с высоконапорными плотинами (70—100 м и более) на заполнение мертвого объема расходуется значительно бóльшая доля годового стока (до 100 % и более), при этом период наполнения таких водохранилищ растягивается на 3—4 года, т. е. ежегодные потери стока составляют около 15—20 % его среднегодового значения. Говоря о суммарных единовременных годовых потерях стока на заполнение мертвого объема водохранилищ СССР следует отметить, что они на 90—95 % определяются затратами воды на заполнение крупных водохранилищ объемом более 1 км³. При наличии на реке каскада крупных водохранилищ, которые заполняются одновременно, общие потери воды на заполнение мертвого объема водохранилищ в каскаде могут быть весьма существенными. Например, в 1955 г., когда на р. Волге наполнялись мертвые объемы сразу трех водохранилищ (Горьковского, Куйбышевского и Камского) суммарные потери годового стока составили 20,6 км³ или 8 % годового стока в створе Куйбышевского гидроузла.

Ежегодные потери воды на заполнение мертвого объема крупных речных водохранилищ в период 1950—1970 гг. колебались в широких пределах, достигая нередко 30—35 км³/год. В последний 15-летний период они стабилизировались и составили в основном до 10 км³/год (рис. 9.1).

В целом на заполнение мертвого объема водохранилищ СССР объемом более 100 млн м³ в период от начала их массового строительства (1952—1975 гг.) до 1985 г. затрачено 568 км³ воды, что составляет 12 % суммарного годового стока рек СССР. Однако для отдельных речных бассейнов этот показатель существенно больше (см. табл. 9.2). В бассейне Енисея, например, на заполнение мертвого объема водохранилищ к концу 1985 г. было израсходовано 251 км³ воды, что составляет более 44 % нормы годового стока, в бассейне Волги — 99,5 км³ (около 40 % нормы), в бассейне Днепра — 26,3 км³ (более 49 %), в бассейне Дона — 16,0 км³ (около 55 %), в бассейне Или — 21,5 км³ (более 100 %).

С использованием проектных материалов выполнена перспективная оценка затрат воды на заполнение мертвого объема будущих водохранилищ по пятилеткам на период до 2005 г. К концу

Таблица 9.2

Потери воды на заполнение мертвого объема водохранилищ в бассейнах крупных рек СССР

Река	Суммарное значение мертвого объема водохранилищ в различные годы $\sum W_{умо_i}$ км³											Норма стока $\bar{Q}$ км³	$\frac{\sum W_{умо_{2005}}}{\bar{Q}}$ 100 %
	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005		
Енисей		1,7	122,8	169,6	205,8	244,3	251,4	251,4	254,1	318,1	382,2	564	68
Волга	25,0	60,2	79,3	90,5	90,6	90,9	99,5	99,7	99,9	99,9	99,9	254	39
Обь		11,8	24,4	24,6	24,8	24,8	24,8	24,8	26,8	31,0	31,9	397	8
Амур					6,2	36,4	36,4	36,4	47,4	54,0	74,3	306	24
Сырдарья		1,0	2,1	2,5	7,4	8,3	8,6	8,8	9,1	10,4	10,4	37,0	28
Днепр	4,7	17,8	23,2	24,1	25,4	26,3	26,3	26,3	26,7	26,7	26,7	53,4	50
Лена			0,1	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	19,1	35,2	50,1	535	9
Дон	15,3	15,4	15,5	15,6	15,8	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	28,8	56
Кура	7,7	7,8	7,9	7,9	8,1	8,2	8,2	9,7	9,8	10,5	10,8	28,3	38
Амударья	0,1	0,2	0,3	0,3	2,8	5,5	6,5	6,5	6,5	8,1	15,5	69,5	22
Или				4,0	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,6	18,1	119
Урал	0,2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	11,4	8
Кубань		0,5	0,5	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	14,2	7

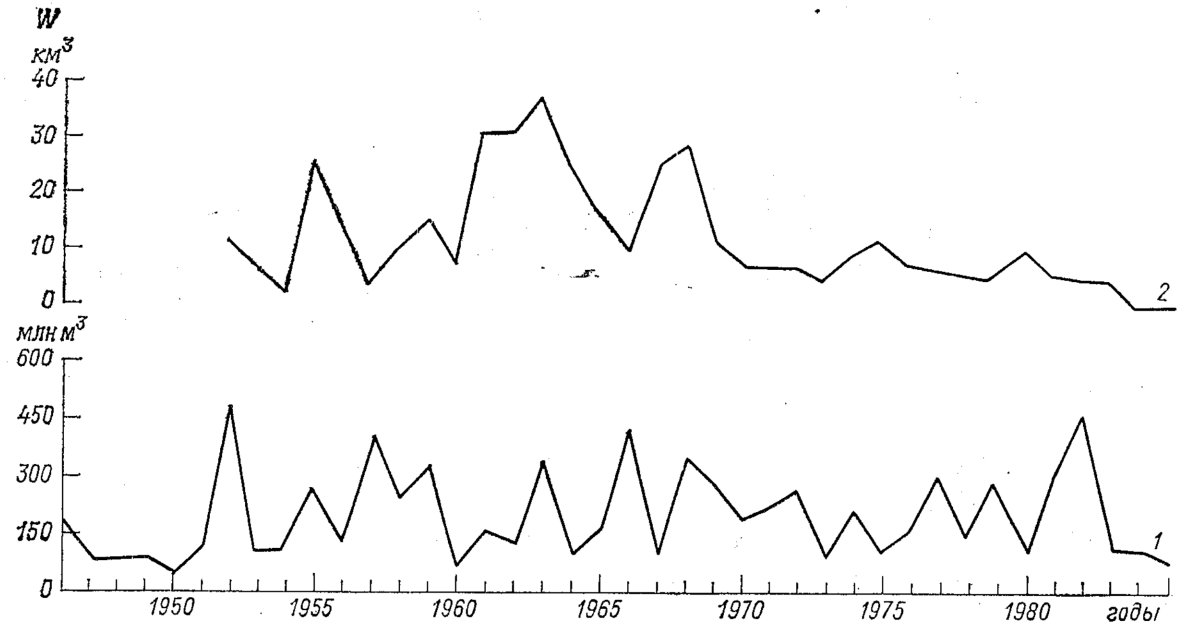


Рис. 9.1. Хронологический график заполнения мертвого объема водохранилищ полным объемом от 101 млн м³ до 1 млрд м³ (*1*) и более 1 млрд м³ (*2*).

этого срока на эти цели будет израсходовано еще 241 км³ воды и суммарный показатель по этому виду временных потерь речного стока достигнет 809 км³. Динамика изменений этих затрат на перспективу по основным речным бассейнам СССР приведена в табл. 9.2.

По разработанной методике оценены потери воды на насыщение берегов 21 крупного речного водохранилища объемом более 1 км³. Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Потери воды на насыщение берегов (числитель) и дна (знаменатель) крупных водохранилищ СССР

Водохранилище	Полный объем, км³	Объем потерь, км³	В % среднегодового стока реки в створе подпорного сооружения
Братское	169,3	4,85/2,50	5,3/2,7
Волгоградское	31,5	1,67/1,50	0,7/0,6
Воткинское	9,4	0,59/0,50	1,1/0,9
Горьковское	8,8	0,32/0,50	0,7/1,1
Днепродзержинское	2,5	0,41/0,30	< 0,1/< 0,1
Зейское	68,4	1,60	6,8
Иваньковское	1,1	0,27/0,70	2,9/7,6
Ириклинское	3,3	0,02	0,2
Иркутское	23 002	0,15	< 0,1
Камское	12,2	0,02/0,60	< 0,1/1,1
Каневское	2,5	0,10/0,10	< 0,1/< 0,1
Капчагайское	28,1	0,38	2,6
Каховское	18,2	0,58/1,40	1,2/3,0
Киевское	3,7	0,03	< 0,1
Кременчугское	13,5	0,65/0,50	1,5/1,1
Куйбышевское	58,0	2,42/3,10	1,0/1,3
Новосибирское	8,8	0,13	< 0,1
Рыбинское	25,4	0,41/4,10	1,4/13,6
Саратовское	12,9	0,18/0,34	0,1/0,1
Цимлянское	23,9	0,90	0,5
Чардаринское	5,7	0,33	1,5

Там же для ряда водохранилищ приведены значения рассчитанных затрат воды на насыщение их ложа. Отсутствие надежных гидрогеологических материалов не позволило выполнить такие расчеты для всех 46 речных водохранилищ объемом более 1 км³. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что потери воды на насыщение берегов составляют, как правило, 1—3 % среднегодового стока реки в створе подпорного сооружения. При создании конкретного водохранилища рассмотренные виды временных потерь стока имеют место лишь в течение ограниченного периода. Поэтому при оценке влияния водохранилищ на средний многолетний годовой сток реки их не учитывают. В то же время при составлении текущих водохозяйственных балансов или расчетах изменений стока под влиянием водохранилищ за конкретные месяцы и

годы учет указанных потерь необходим, так как их можно сопоставить с другими составляющими водных и водохозяйственных балансов.

9.2. Оценка постоянных изменений стока рек под влиянием водохранилищ

На основе методических положений, изложенных в п. 8.2.1, оценены среднегодовые потери речного стока на дополнительное испарение с зон затопления и подтопленных территорий крупных водохранилищ СССР по состоянию на 1985 г. и на перспективу до 2005 г. При этом размеры зон затопления определены исходя из площади водной поверхности водохранилищ при НПУ. Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 9.4. Суммарное среднегодовое снижение стока основных рек СССР под влиянием созданных водохранилищ по состоянию на 1985 г. по оценкам автора составило около 16 км^3/год, в том числе около 12 км^3/год за счет потерь с зон затопления. Эти значения несколько меньше оценок, приведенных в работах И. А. Шикломанова и Г. М. Веретенниковой [156, 158]. Эти авторы оценили в конце 70-х годов суммарные потери с зон затопления и подтопления водохранилищ СССР для 1981—1985 гг. в размере 20—22 км^3/год. Различие в полученных оценках можно объяснить несколькими обстоятельствами:

1) более медленными темпами создания и заполнения водохранилищ в период 1981—1985 гг. по сравнению с теми, которые намечали в конце 70-х годов;

2) использованием более обширной исходной информации и усовершенствованных методических приемов, позволяющих получать более надежные оценки;

3) недоучетом некоторого объема потерь с зон затопления и потопления средних и малых водохранилищ и прудов (размеры этих потерь составляют не более 5 % аналогичных потерь, определенных для крупных водохранилищ).

К 2005 г. суммарные потери на дополнительное испарение с зон затопления и подтопления оценено в 20 км^3/год. Распределение этих потерь по отдельным речным бассейнам приведено в табл. 9.5. Следует иметь в виду, что за счет компенсации, связанной с уменьшением потерь на испарение в дельтовых участках рек при регулировании стока (см. часть IV), суммарная экономия воды в 1985 г. оценена в 5 км^3/год. Этот компенсационный объем не изменится и в перспективе до 2005 г.

По изложенной в п. 8.2.1 методике выполнены также детальные расчеты изменения среднемесячного стока по отдельным годам для ряда крупных водохранилищ Днепровского каскада (Днепровского им. В. И. Ленина, Днепродзержинского, Кременчугского, Каховского). Расчеты показали, что водохранилища наиболее существенно снижают сток в замыкающем створе в многоводные годы. В маловодные периоды месячные изменения стока

Таблица 9.4

Потери на испарение с зон затопления и подтопления крупных речных водохранилищ СССР

Водохранилище	$f_з$ км²	$f_{пдт}$ км²	$\Delta z_з$ мм	$\Delta z_{пдт}$ мм	$u_з$ км³/год	$u_{пдт}$ км³/год	Сумма потерь км³/год
Андижанское	53	48	700	600	0,04	0,03	0,07
Араксинское	140	60	650	550	0,09	0,03	0,12
Братское *	4100	610	70	50	0,29	0,03	0,32
Вилюйское	1520	890	115	115	0,17	0,10	0,27
Волгоградское *	2180	810	320	250	0,70	0,20	0,90
Воткинское *	980	910	60	60	0,06	0,05	0,11
Горьковское *	1110	890	80	50	0,09	0,04	0,13
Днепровское	360	345	280	210	0,10	0,07	0,17
Днепродзержинское *	540	505	170	110	0,09	0,06	0,15
Днестровское	135	70	150	80	0,02	0,01	0,03
Зейское *	2130	180	110	70	0,23	0,01	0,24
Иваньковское *	288	268	70	70	0,02	0,02	0,04
Ириклинское *	250	160	360	280	0,09	0,04	0,13
Кайраккумское	520	440	340	260	0,18	0,11	0,29
Камское *	1680	950	80	80	0,13	0,01	0,14
Каневское *	540	430	165	95	0,09	0,04	0,13
Капчагайское *	1750	831	890	770	1,56	0,13	1,69
Каховское *	2050	920	370	290	0,76	0,27	1,03
Киевское *	880	445	150	80	0,13	0,04	0,17
Костешты-Стынка	56	40	350	270	0,02	0,01	0,03
Краснодарское	380	340	400	315	0,15	0,11	0,26
Красноярское	1500	940	410	345	0,61	0,32	0,93
Кременчугское *	2139	764	170	100	0,36	0,08	0,44
Куйбышевское *	4430	780	160	100	0,71	0,08	0,79
Курейское	530	470	70	70	0,04	0,03	0,07
Мингечаурское	570	60	700	630	0,40	0,04	0,44
Нижнекамское	2450	1010	100	70	0,24	0,07	0,31
Новосибирское *	940	650	170	115	0,16	0,02	0,18
Нурекское	95	10	1200	1060	0,11	0,01	0,12
Павловское	85	50	110	95	0,01	—	0,01
Рыбинское *	4320	1060	75	75	0,32	0,08	0,40
Саратовское *	1370	950	225	160	0,31	0,15	0,46
Саяно-Шушенское	590	60	320	270	0,19	0,02	0,21
Токтогульское	270	30	750	625	0,20	0,02	0,22
Тюямуюнское	740	620	1050	930	0,78	0,58	1,36
Угличское	175	160	90	90	0,02	0,01	0,03
Усть-Илимское	1830	200	100	60	0,18	0,01	0,19
Хантайское	2010	990	70	70	0,14	0,07	0,21
Цимлянское *	2380	1185	405	320	0,96	0,38	1,34
Чардаринское *	860	250	1000	870	0,86	0,22	1,08
Чарвакское	38	4	600	490	0,02	—	0,02
Чебоксарское	2080	980	80	50	0,17	0,05	0,22
Шекснинское	1590	920	60	60	0,10	0,05	0,15
Сумма					11,9	3,7	15,6

* Площадь подтопления водохранилищ определена детальным способом с использованием формулы (8.83), для других водохранилищ — по графику на рис. 8.5 или по литературным данным.

зависят в основном от характера его регулирования. Пример расчета месячных изменений стока под влиянием Кременчугского водохранилища приведен в прил. 9.

Таблица 9.5

Объем потерь с зон затопления (числитель) и подтопления (знаменатель) водохранилищ на перспективу (по бассейнам крупных рек СССР), км³/год

Река	Расчетный период, годы				
	1981–1985	1986–1990	1991–1995	1996–2000	2001–2005
Енисей	1,45/0,48	1,45/0,48	1,48/0,50	1,64/0,54	2,28/0,79
Волга	2,87/0,81	2,88/0,82	2,89/0,83	2,89/0,83	2,89/0,83
Обь	0,16/0,02	0,16/0,02	0,23/0,05	0,35/0,13	0,37/0,14
Амур	0,23/0,01	0,23/0,01	0,41/0,12	0,64/0,24	0,87/0,37
Сырдарья	1,06/0,33	1,06/0,33	1,06/0,33	1,09/0,35	1,12/0,38
Днепр	1,53/0,56	1,53/0,56	1,53/0,56	1,53/0,56	1,53/0,56
Лена	0,17/0,10	0,17/0,10	0,18/0,11	0,25/0,14	0,31/0,16
Дон	0,96/0,38	0,96/0,38	0,96/0,38	0,96/0,38	0,96/0,38
Кура	0,49/0,07	0,61/0,17	0,61/0,17	0,61/0,17	0,70/0,26
Амударья	0,78/0,58	0,78/0,58	0,78/0,58	1,03/0,80	1,03/0,80
Колыма		0,03/0,02	0,03/0,02	0,04/0,03	0,04/0,03

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы отмечен существенный рост интереса не только специалистов, но и общественности к проблемам дальнейшего развития энергетического строительства в СССР, особенно к вопросам экологической целесообразности создания новых мощных гидроэлектростанций с крупными водохранилищами, занимающими площади в несколько тысяч квадратных километров. Хотя во многих выступлениях печати и в дискуссиях на различных общественных форумах высказывают негативное отношение к строительству крупных ГЭС, сами по себе гидроэлектростанции, как известно, относятся к числу наиболее «чистых» энергетических объектов. Негативное отношение к созданию ГЭС связано прежде всего с имевшими место в прошлом и, к сожалению, еще не изжитыми и сейчас фактами бездумного обращения с природным комплексом в районах строительства гидроузлов. Необходимо отдавать себе отчет в том, что определенный ущерб природе при создании крупных водохранилищ неизбежен, так как невозможно предотвратить затопление части земель или, например, обеспечить сохранение лесной растительности в пределах зоны затопления. Этого можно добиться, только отказавшись от строительства крупных ГЭС с водохранилищами, что на современном этапе развития энергетики нереально. Главные критерии целесообразности создания крупных ГЭС— их экономическая, социальная и экологическая обоснованность. Последнему аспекту до недавнего времени уделялось недостаточное внимание. Сейчас вопросы экологической экспертизы проектов крупных водохранилищ приобрели большую актуальность. Здесь весьма широкое поле деятельности для ученых и специалистов, занимающихся изучением водохранилищ, как природных объектов, и их влияния на окружающую природную среду. Проблема эта многоплановая, требующая изучения различных взаимосвязей в системе водохранилище — природная среда (изменений климатических, гидрологических, биологических, гидрохимических показателей качества воды т. д.).

В настоящей монографии предпринята попытка всестороннего освещения лишь одного аспекта проблемы — особенностей водообмена в системе речной бассейн — водохранилище. Детально рассмотрены три характерных звена этого взаимодействия: особенности водного баланса водохранилищ, закономерности формирования и использования их водных ресурсов и влияние водохранилищ на водные ресурсы реки. Приведенные в монографии результаты выполненных исследований предназначены в первую очередь для использования при рассмотрении гидрологических аспектов взаимодействия водохранилищ с окружающей природной средой. Насколько полно решена поставленная задача — судить читателям.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Испарение с водной поверхности плавучего испарительного бассейна площадью 20 м², рассчитанное по предложенной методике по месяцам и за год, мм

Водоем, водноиспарительная станция	Период осреднения	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сезон (год)	Способ определения
Краснооскольское вдхр., ст. Красный Оскол	1966—74				12	104	129	158	148	99	48	25		723	1
Водохранилище на р. Кубалта, ст. Кубалта	1962—74				71	102	124	128	116	77	41	23		683	2
Докучаевское вдхр., ст. Каменная Степь	1961—65				16	82	126	145	132	89	45			635	2
Озеро в пойме р. Зеи, ст. Бомнак	1958—75					22	85	87	68	46	7			315	2
Иркутское вдхр., ст. Патроны	1958—71					23	42	39	52	59	46			261	2
оз. Неджели, п. Арыктах	1969—75						41	120	88	42				291	2
Тамбуканское озеро, п. Тамбуканское озеро	1967—75				56	102	102	139	122	81	42	58		702	2
Рыбинское вдхр., ПОМ	1958—64					15	111	114	101	59	25	6		431	2
оз. Аргаяш, п. Аргаяш	1961—68					36	107	138	122	82	34			519	2
кан. Северский Донец — Донбасс, п. Высоко-Ивановка	1958—72					91	135	149	121	80	42			618	2
Катта-Курганское вдхр., п. Каттакурган	1961—69			54	89	151	219	269	264	180	105	36	19	1386	2
	1954—65	26	29	41	82	146	199	240	220	163	92	52	34	1327	По данным работы [53]
оз. Большие Чаны, ст. Квашнино	1953—62					42	133	150	122	71	10			527	2
оз. Нарочь, ст. Нарочь	1963—75				9	52	85	104	98	68	39	12		467	2
оз. Имандра, ст. Хибины	1955—62						42	73	66	46	16	6		249	2
Бухтарминское вдхр., с. Селезневка	1968—74					34	76	101	122	94	77	20		524	1

Иваньковское вдхр., с. Безбородово	1968—74					18	106	124	103	71	26			448	2
	1952—72					73	108	117	103	73	43	5		552	По данным работы [53]
оз. Шакшинское, п. Беклемишево	1964—75					32	101	89	81	54	9			336	2
вдхр. им. Ленина, г. Запорожье	1955—67				25	86	126	155	160	142	83	46	13	836	2
	1961—70				18	89	129	176	165	122	68	32	14	813	По данным работы [53]
Угличское вдхр., г. Углич	1965—75					62	109	117	97	73	30			488	2
	1948—72					68	109	130	123	82	54	7		576	По данным работы [53]
оз. Сартай, п. Дусетос	1955—70				27	75	118	125	102	69	37	14		567	2
оз. Половинное, с. Половинное	1961—67					51	97	103	84	63	18			416	2
оз. Севан, п. Севан-остров	1955—60					52	82	122	148	134	116	41		696	3
оз. Чудское, с. Тийрикоя	1954—62					31	85	97	92	59	18			382	3
оз. Часкак, п. Часкак	1961—66	41	46	81	104	177	247	281	248	180	120	72	37	1634	3
Кенгирское вдхр., г. Джезказган	1961—74				74	120	182	215	193	157	90	14		1045	3
Тедженское вдхр., г. Теджен-строй	1962—67	24	42	72	108	173	254	294	266	189	113	63	34	1632	3
Плес р. Большой Узень, ст. Фурманово	1960—70				32	132	179	210	173	118	57	15		916	3
Сары-Язинское вдхр., п. Сары-Язы	1959—68	24	34	66	101	184	256	302	271	189	115	57	36	1635	3
Днепродзержинское вдхр., г. Днепродзержинск	1966—75				37	104	113	127	120	104	79	38		722	4
	1965—72				15	78	128	154	156	128	58	11	2	730	По данным работы [53]
Ириклинское вдхр., п. Ириклинский	1963—74				8	46	87	131	142	124	61			599	4
Рыбинское вдхр., г. Рыбинск	1965—75					60	89	121	130	93	61			554	4
	1948—72					41	104	117	119	76	38	24		519	По данным работы [53]
Каховское вдхр., г. Новая Каховка	1963—74				29	64	110	135	141	124	86	50		768	4
	1960—70			10	23	73	122	163	174	135	76	32	16	824	По данным работы [53]

Водоем, водноиспарительная станция	Период осреднения	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сезон (год)	Способ определения
Куйбышевское вдхр., п. Вязовые	1955—74				13	86	105	122	126	92	43	26		613	4
	1957—40				13	71	103	131	132	104	66	26		646	По данным работы [53]
Рыбинское вдхр., мыс Рожновского	1955—63					42	89	119	124	92	50			516	4
Карловское вдхр., п. Карловка	1960—70				50	109	121	142	132	109	67	23	14	767	4
Кременчугское вдхр., г. Светловодск	1967—74				51	113	127	138	137	126	77	42		811	4
	1960—69				27	95	140	161	161	114	64	22	2	786	По данным работы [53]
Цимлянское вдхр., п. Цимлянский	1955—74				37	81	127	160	160	133	92	32		822	4
	1953—72				43	105	150	188	200	172	105	57		1020	По данным работы [53]
Куйбышевское вдхр., г. Куйбышев	1955—73				13	66	79	112	129	108	56	26		602	4
	1957—70				13	71	103	131	132	104	66	26		646	По данным работы [53]
Волгоградское вдхр., г. Волжский	1961—74				7	29	63	143	158	142	102	26		670	4
	1962—72				2	20	86	157	180	146	99	42		732	По данным работы [53]
Самгорское вдхр., г. Самгори	1962—74	61	42	41	43	124	107	128	127	102	103	70	38	986	4
Братское вдхр., п. Балаганск	1964—75					28	60	102	101	82	24			397	4
	1960—71				24	27	34	56	69	68	60	43	2	383	По данным работы [53]
Дубоссарское вдхр., г. Дубоссары	1957—74				64	96	106	116	119	98	73	32		704	4
	Многолетний ряд			13	61	92	123	156	151	127	82	12		817	По данным работы [53]
п. Тон гара	1963—75						62	79	84	45	24			294	5
г. Чита	1955—75					54	125	118	101	85	11			494	5
оз. Ханка, п. Астраханка	1957—75				9	118	105	93	98	87	81			601	5

Братское вдхр., г. Братск	1953—75					31	85	94	86	58	17			371	5
	1960—71				24	27	34	56	69	68	60	43	2	383	По данным работы [53]
г. Ангарск	1953—75					60	96	90	104	71	35			456	5
п. Кайластуй	1955—75					32	140	129	129	111	56			597	5
г. Якутск	1959—75						90	114	102	63	4			373	5
п. Прикумск	1955—74			7	85	120	145	161	154	122	90	34		918	5
г. Ершов	1955—74					123	135	151	142	68	61			680	5
п. Клепинино	1955—74			14	78	101	124	142	138	107	82	30		816	5
г. Ашхабад	1955—74	48	72	94	129	159	165	165	107	100	51	20	18	1128	5
п. Карачуны	1959—63				62	102	101	114	126	106	53	6		670	5
г. Болград	1955—74			48	96	106	122	141	148	120	82	37		900	5
г. Приморск	1969—75					30	101	100	89	70	37			427	5
г. Ушканий остров	1954—75					20	64	75	78	84	19			340	5
г. Салехард	1961—75						39	105	81	41				266	5
г. Элиста	1957—71				79	139	142	173	155	136	100	26		950	5
г. Каменка	1955—65					96	92	86	78	65	23			440	5
г. Рыбачье	1956—74			86	108	131	172	178	165	135				1124	5
г. Камень-на-Оби	1955—75					45	133	121	116	99	21			535	5
г. Валдай	1952—69					32	92	106	96	72	38			402	2
ст. Каневская	1962—74				68	89	104	122	120	94	59	25		681	5
г. Минск	1955—74				41	93	93	133	98	80				538	5
г. Ахалсопели	1958—70	68	49	79	113	128	144	132	135	138	122	100	70	1278	5
г. Тахиаташ	1955—74			3	98	132	191	201	184	149	104	34	4	1100	5
г. Нижнедевицк	1957—74				32	98	109	107	112	88	41			587	5

Примечание. Способы определения испарения:

1. По данным плавучего испарительного бассейна площадью 20 м².
2. По данным плавучего испарителя ГГИ-3000 с расчетом по формуле (3.27).
3. Совмещение второго способа с расчетом для отдельных месяцев по полной расчетной схеме, основанной на использовании материалов наблюдений наземного испарителя ГГИ-3000 и определении температуры воды водоема t_0 по фактическим данным.
4. Расчет по предложенной методике с определением t_0 по фактическим данным.
5. Расчет по предложенной методике с определением t_0 расчетным путем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчет осредненных по направлению значений $M_{б.\,ср_{пр}}$ для условных водоемов, имеющих форму окружности

Вариант расчета								
1			2			3		
L_i км	$M_{б.\,ср_i}$	$L_i M_{б.\,ср_i}$	L_i км	$M_{б.\,ср_i}$	$L_i M_{б.\,ср_i}$	L_i км	$M_{б.\,ср_i}$	$L_i M_{б.\,ср_i}$
9,1	0,27	2,46	0,9	0,11	0,1	0,09	0,02	0,0018
12,2	0,29	3,54	1,2	0,13	0,16	0,12	0,02	0,0024
14,5	0,31	4,49	1,4	0,14	0,20	0 14	0,02	0,0028
16,1	0,32	5,15	1,6	0,14	0,22	0,16	0,03	0,0048
17,5	0,33	5,77	1,7	0,15	0,25	0,17	0,03	0,0051
18,5	0,33	6,10	1,8	0,15	0,27	0,18	0,03	0,0054
19,3	0,33	6,37	1,9	0,16	0,30	0,19	0,03	0,0057
19,8	0,34	6,73	2,0	0,16	0,32	0,2	0,03	0,0060
20,0	0,34	6,80	2,0	0,16	0,32	0,2	0,03	0,0060
20,0	0,34	6,83	2,0	0,16	0,32	0,2	0,03	0,0060
20,0	0,34	6,80	2,0	0,16	0,32	0,2	0,03	0,0060
19,8	0,34	6,73	2,0	0,16	0,32	0,2	0,03	0,0060
19,1	0,33	6,30	1,9	0,16	0,30	0,19	0,03	0,0057
18,4	0,33	6,07	1,8	0,15	0,27	0,18	0,03	0,0054
17,4	0,33	5,74	1,7	0,15	0,25	0,17	0,03	0,0051
15,9	0,32	5,09	1,6	0,14	0,22	0,16	0,03	0,0048
14,2	0,30	4,26	1,4	0,14	0,20	0,14	0,02	0,0028
11,9	0,29	3,45	1,2	0,13	0,16	0,12	0,02	0,0024
8,6	0,27	2,32	0,9	0,11	0,1	0,09	0,02	0,0018
312,3		101,0	31		4,6	3,1		0,084
$M_{б.\,ср_{пр}} = 0{,}32$			$M_{б.\,ср_{пр}} = 0{,}15$			$M_{б.\,ср_{пр}} = 0{,}03$		

Примечание. Расчеты выполнены на примере условного водоема округлой формы, рассеченного системой параллельных, равно отстоящих друг от друга отрезков; коэффициенты $M_{б.\,ср_i}$ определены в зависимости от длин отрезков L_i, с использованием Указаний [150].

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Расчет средних значений $\overline{M}_{б.\,ср}$ с учетом повторяемости направлений ветра P % (по данным прил. 2)

Направление	Вариант расчета					
	1		2		3	
	P	$M_{б.\,ср_{пр}}$	P	$M_{б.\,ср_{пр}}$	P	$M_{б.\,ср_{пр}}$
С — Ю	25	8,0	45	6,75	75	2,25
З — В	30	9,6	5	0,75	10	0,3
СВ — ЮЗ	25	8,0	5	0,75	5	0,15
СЗ — ЮВ	20	6,4	45	6,75	10	0,3
		32		15		3
	$\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}32$		$\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}15$		$\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}3$	

Примечание. Определение длины разгона $L_{ср}$ по предложенной зависимости $L_{ср} = 0{,}78D$ дает практически те же результаты:

$D = 20$ км, $L_{ср} = 15{,}6$ км, $\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}32$;

$D = 2$ км, $L_{ср} = 1{,}56$ км, $\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}14$;

$D = 0{,}2$ км, $L_{ср} = 0{,}16$ км, $\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}03$;

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Пример расчета осредненных по направлениям значений $M_{б.\,ср/пр}$ для условного водоема, имеющего форму прямоугольника

Направление											
С — Ю			В — З			СВ — ЮЗ			СЗ — ЮВ		
L_i км	$M_{б.\,ср_i}$	$L_i M_{б.\,ср_i}$	L_i км	$M_{б.\,ср_i}$	$L_i M_{б.\,ср_i}$	L_i км	$M_{б.\,ср_i}$	$L_i M_{б.\,ср_i}$	L_i км	$M_{б.\,ср_i}$	$L_i M_{б.\,ср_i}$
20 *	0,34	0,34 *	250 *	0,75	0,75*	2	0,16	0,32	2	0,16	0,32
						5	0,23	1,15	5	0,23	1,15
						7	0,25	1,75	7	0,25	1,75
						10	0,28	2,80	10	0,28	2,80
						12	0,29	3,48	12	0,29	3,48
						14	0,30	4,20	14	0,30	4,20
						16	0,32	5,12	16	0,32	5,12
						18	0,33	5,94	18	0,33	5,94
						20	0 34	6,80	20	0,34	6,80
						22	0,35	7,70	22	0,35	7,70
						24	0,35	8,40	24	0,35	8,40
						26	0,36	9,36	26	0,36	9,36
						27	0,36	9,72	27	0,36	9,72
						28 *	0,37 *	10,36 *	28 *	0,37 *	10,36 *
						27	0,36	9,72	27	0,36	9,72
						26	0,36	9,36	26	0,36	9,36
						24	0,35	8,40	24	0,35	8,40
						22	0,35	7,70	22	0,35	7,70
						20	0,34	6,80	20	0,34	6,80
						18	0,33	5,94	18	0,33	5,94
						16	0,32	5,12	16	0,32	5,12
						14	0,30	4,20	14	0,30	4,20
						12	0,29	3,48	12	0,29	3,48
						10	0,28	2,80	10	0,28	2,80
						7	0,25	1,75	7	0,25	1,75
						5	0,23	1,15	5	0,23	1,15
						2	0,16	0,32	2	0,16	0 32
						4970		1822,16	4970		1822,16
	$M_{б.\,ср_{пр}} = 0{,}34$			$M_{б.\,ср_{пр}} = 0{,}75$			$M_{б.\,ср_{пр}} = 0{,}37$			$M_{б.\,ср_{пр}} = 0{,}37$	

* Расчеты выполнены на примере условного водоема прямоугольной формы, рассеченного в 4-х направлениях (под углом 45°) системами параллельных, равно отстоящих друг от друга отрезков. Коэффициенты $M_{б.\,ср_i}$ определены в зависимости от длины отрезков L_i с использованием Указаний [150]. Стороны принятого прямоугольника ориентированы в направлениях С — Ю (короткое) и В — З (длинное). В связи с этим длина разгона для каждого из 249 профилей по первому направлению одинакова и равна 20 км, а длина разгона для каждого из 19 профилей по второму направлению также одинакова и равна 250 км. В направлениях СВ — ЮЗ и СЗ — ЮВ 163 профиля имеют одинаковую длину 28 км.

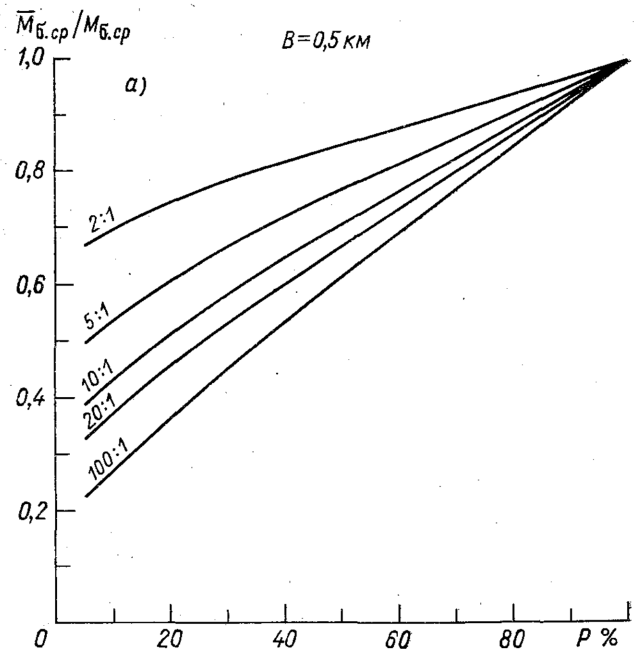
ПРИЛОЖЕНИЕ 5

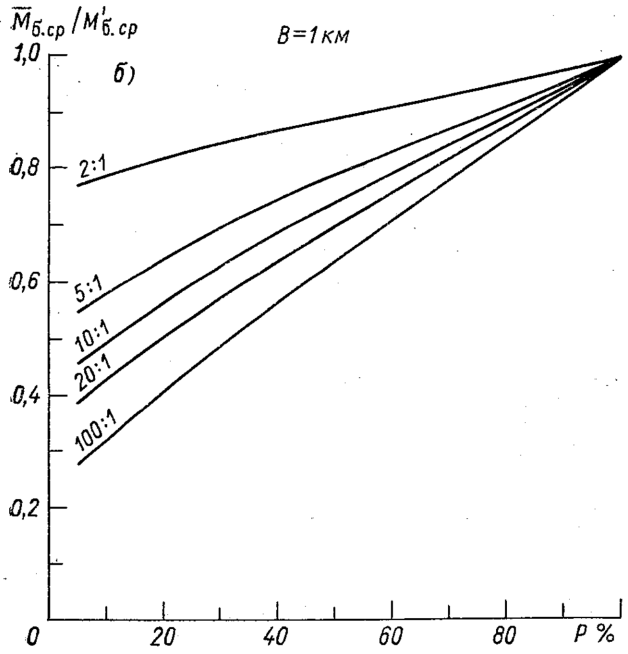
Расчет средних значений $\overline{M}_{б.\,ср}$ с учетом повторяемости направлений ветра P (по данным прил. 4)

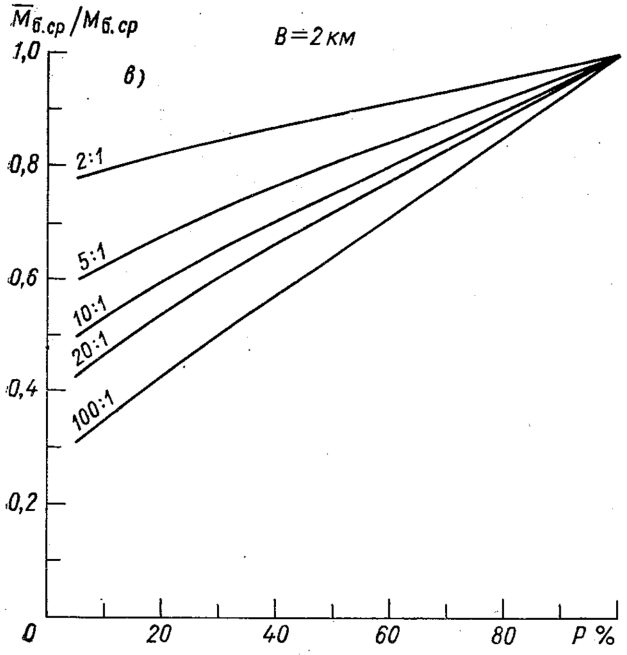
Направление	Вариант расчета							
	1		2		3		4	
	P	$M_{б.\,ср_{пр}}P$	P	$M_{б.\,ср_{пр}}P$	P	$M_{б.\,ср_{пр}}P$	P	$M_{б.\,ср_{пр}}P$
С — Ю	25	8,5	85	28,9	5	1,7	5	1,7
З — В	25	18,75	5	3,75	85	63 75	35	26,25
СВ — ЮЗ	25	9,25	5	1,85	5	1,85	55	20,35
СЗ — ЮВ	25	9,25	5	1,85	5	1,85	5	1,85
		45,75		36,35		69,15		50,15
	$\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}46$		$\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}36$		$\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}69$		$\overline{M}_{б.\,ср} = 0{,}50$	

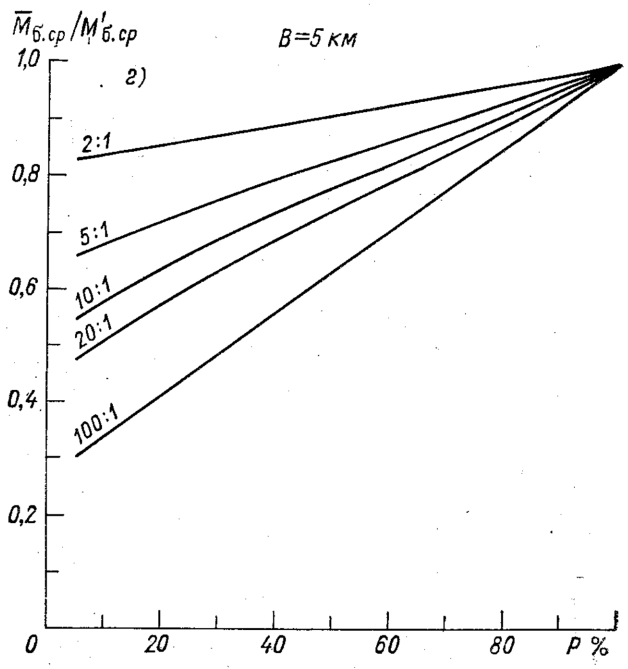
ПРИЛОЖЕНИЕ 6

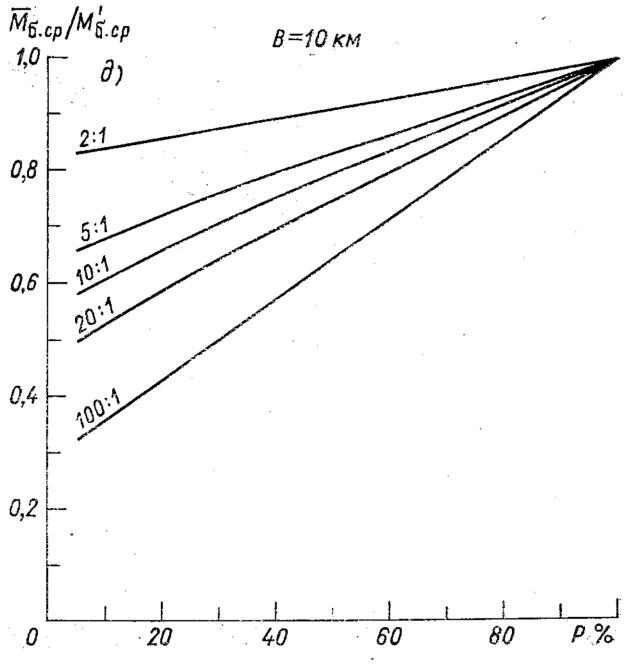
Зависимость среднего значения коэффициента трансформации $\overline{M}_{б.\,ср}$ от повторяемости ветра (P), дующего в направлении длинной оси водоема, и от значений $\overline{M}'_{б.\,ср}$ при различных соотношениях длины и ширины водохранилища (при ширине водоема B = 0,5...10 км)




$\overline{M}_{б.ср}/M'_{б.ср}$
B=1км
б)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
2:1
5:1
10:1
20:1
100:1
20
40
60
80
P %


$\overline{M}_{б.ср}/M_{б.ср}$
B=2км
в)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
2:1
5:1
10:1
20:1
100:1
20
40
60
80
P %


$\overline{M}_{б.ср}/M'_{б.ср}$
B=5 км
г)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
2:1
5:1
10:1
20:1
100:1
20
40
60
80
P %


$\overline{M}_{б.ср}/M'_{б.ср}$
B=10 км
д)
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
2:1
5:1
10:1
20:1
100:1
20
40
60
80
P %

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Определение температуры поверхности воды t_0 в зависимости от параметра Φ_2 и среднемесячной скорости ветра над водоемом ω_2 для водохранилищ различной глубины

t_0 °С	Значения параметра Φ_2 при различной скорости ветра над водоемом ω_2, м/с				
	1	2	3	4	5
	Средняя глубина водохранилища $H = 2$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 092	3 335	3 573	3 821	4 064
4	3 356	3 670	3 985	4 299	4 613
6	3 620	4 006	4 391	4 777	5 162
8	3 892	4 358	4 823	5 288	5 753
10	4 173	4 722	5 271	5 820	6 369
12	4 462	5 099	5 736	6 373	7 010
14	4 756	5 485	6 214	6 943	7 672
16	5 057	5 891	6 725	7 559	8 392
18	5 372	6 314	7 257	8 200	9 142
20	5 694	6 758	7 823	8 887	9 951
22	6 034	7 224	8 414	9 603	10 793
24	6 381	7 710	9 038	10 366	11 694
26	6 738	8 212	9 687	11 162	12 637
28	7 110	8 749	10 387	12 025	13 664
30	7 500	9 310	11 120	12 930	14 740
	Средняя глубина водохранилища $H = 4$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 205	3 448	3 691	3 934	4 177
4	3 574	3 888	4 202	4 517	4 831
6	3 951	4 337	4 722	5 108	5 493
8	4 337	4 802	5 267	5 732	6 197
10	4 726	5 275	5 824	6 373	6 922
12	5 124	5 761	6 398	7 035	7 672
14	5 527	6 256	6 968	7 714	8 443
16	5 941	6 775	7 609	8 443	9 277
18	6 365	7 307	8 250	9 193	10 136
20	6 796	7 860	8 925	9 989	11 053
22	7 244	8 434	9 624	10 811	12 804
24	7 705	9 034	10 362	11 690	13 018
26	8 170	9 645	11 120	12 595	14 070
28	8 656	10 295	11 933	13 571	15 210
30	9 155	10 965	12 775	14 585	16 395
	Средняя глубина водохранилища $H = 6$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 302	3 545	3 788	4 031	4 274
4	3 771	4 085	4 400	4 714	5 028
6	4 244	4 630	5 015	5 401	5 786
8	4 726	5 191	5 656	6 122	6 587
10	5 212	5 770	6 310	6 859	7 408
12	5 711	6 348	6 985	7 622	8 258
14	6 239	6 968	7 697	8 426	9 155
16	6 725	7 559	8 392	9 226	10 077
18	7 244	8 187	9 130	10 072	11 016

t_0, °C	Значения параметра Φ_2 при различной скорости ветра над водоемом ω_2, м/с				
	1	2	3	4	5
20	7 781	8 845	9 909	10 979	12 038
22	8 326	9 515	10 705	11 895	13 085
24	8 883	10 211	11 539	12 867	14 196
26	9 448	10 923	12 398	13 879	15 348
28	10 031	11 669	13 307	14 946	16 584
30	10 626	12 436	14 246	16 056	17 866
	Средняя глубина водохранилища $H = 8$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 398	3 641	3 884	4 127	4 370
4	3 964	4 278	4 592	4 906	5 221
6	4 538	4 923	5 309	5 694	6 080
8	5 116	5 581	6 046	6 511	6 976
10	5 698	6 256	6 796	7 345	7 894
12	6 293	6 930	7 567	8 204	8 841
14	6 892	7 622	8 351	9 080	9 809
16	7 504	8 338	9 172	10 005	10 856
18	8 120	9 063	10 005	10 948	11 891
20	8 746	9 813	11 003	11 942	13 006
22	9 390	10 580	11 770	12 960	14 150
24	10 048	11 376	12 704	14 032	15 360
26	10 710	12 184	13 659	15 134	16 609
28	11 388	13 027	14 665	16 303	17 942
30	12 080	13 890	15 700	17 510	19 320
	Средняя глубина водохранилища $H = 10$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 494	3 737	3 980	4 225	4 466
4	4 161	4 475	4 789	5 103	5 418
6	4 827	5 212	5 598	5 983	6 369
8	5 501	5 966	6 432	6 897	7 362
10	6 184	6 742	7 282	7 831	8 380
12	6 876	7 513	8 150	8 786	9 423
14	7 571	8 300	9 029	9 758	10 488
16	8 279	9 113	9 947	10 780	11 631
18	8 992	9 934	10 877	11 820	12 762
20	9 721	10 785	11 850	12 914	13 978
22	10 458	11 732	12 838	14 028	15 218
24	11 208	12 536	13 865	15 193	16 521
26	11 970	13 446	14 920	16 395	17 870
28	12 746	14 384	16 022	17 661	19 300
	Средняя глубина водохранилища $H = 12$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 566	3 809	4 052	4 286	4 538
4	4 295	4 609	4 923	5 238	5 552
6	5 032	5 418	5 803	6 189	6 574
8	5 824	6 243	6 708	7 173	7 638
10	6 524	7 073	7 622	8 170	8 720
12	7 291	7 923	8 560	9 197	9 834
14	8 053	8 782	9 511	10 240	10 970
16	8 824	9 658	10 492	11 326	12 159
18	9 608	10 550	11 493	12 436	13 379
20	10 404	11 468	12 532	13 596	14 661
22	11 208	12 398	13 588	14 778	15 968

t_0, °С	Значения параметра Φ_1 при различной скорости ветра над водоемом ω_2, м/с				
	1	2	3	4	5
24	12 029	13 358	14 686	16 014	17 342
26	12 859	14 334	15 809	17 284	18 759
28	13 705	15 344	16 982	18 620	20 259
30	14 560	16 370	18 180	19 990	21 800
	Средняя глубина водохранилища $H = 14$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 633	3 876	4 119	4 362	4 605
4	4 433	4 747	5 062	5 376	5 690
6	5 238	5 623	6 008	6 394	6 780
8	6 050	6 515	6 980	7 446	7 911
10	6 867	7 416	7 965	8 514	9 063
12	7 697	8 334	8 971	9 608	10 244
14	8 531	9 260	9 989	10 718	11 447
16	9 373	10 207	11 041	11 874	12 708
18	10 224	11 166	12 109	13 052	13 995
20	11 087	12 151	13 215	14 280	15 343
22	11 962	13 152	14 342	15 532	16 722
24	12 851	14 179	15 507	16 835	18 176
26	13 747	15 222	16 697	18 172	19 647
28	14 661	16 299	17 937	19 576	21 214
30	15 587	17 397	19 207	21 017	22 827
	Средняя глубина водохранилища $H = 16$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 892	4 136	4 378	4 622	4 864
4	4 538	4 852	5 166	5 480	5 795
6	5 392	5 778	6 163	6 549	6 934
8	6 256	6 721	7 186	7 651	8 116
10	7 127	7 676	8 225	8 774	9 323
12	8 007	8 644	9 281	9 918	10 555
14	8 812	9 541	10 270	10 999	11 728
16	9 788	10 622	11 455	12 289	13 123
18	10 689	11 631	12 574	13 517	14 460
20	11 606	12 670	13 735	14 799	15 863
22	12 532	13 722	14 912	16 102	17 292
24	13 471	14 799	16 127	17 456	18 784
26	14 422	15 897	17 372	18 847	20 322
28	15 390	17 028	18 666	20 305	21 943
30	16 404	18 214	20 024	21 834	23 644
	Средняя глубина водохранилища $H = 18$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 721	3 964	4 207	4 450	4 693
4	4 609	4 923	5 238	5 552	5 866
6	5 497	5 883	6 268	6 654	7 039
8	6 398	6 863	7 328	7 793	8 258
10	6 884	7 433	7 982	8 531	9 080
12	8 221	8 858	9 494	10 131	10 768
14	9 138	9 867	10 596	11 326	12 055
16	10 090	10 923	11 757	12 591	13 425
18	11 097	11 950	12 893	13 835	14 778
20	11 968	13 022	14 087	15 151	16 215
22	12 922	14 112	15 302	16 492	17 682
24	13 894	15 222	16 550	17 879	19 207

t_0 °C	Значения параметра Φ_2 при различной скорости ветра над водоемом ω_2, м/с				
	1	2	3	4	5
26	14 879	16 354	17 828	19 303	20 778
28	15 880	17 518	19 157	20 795	22 433
30	16 894	18 704	20 514	22 324	24 134
	Средняя глубина водохранилища $H = 20$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 754	3 997	4 240	4 483	4 726
4	4 676	4 990	5 304	5 619	5 933
6	5 606	5 992	6 377	6 763	7 148
8	6 540	7 006	7 471	7 936	8 401
10	7 479	8 029	8 577	9 126	9 675
12	8 430	9 067	9 704	10 341	10 978
14	9 386	10 098	10 844	11 573	12 302
16	10 352	11 187	12 021	12 855	13 689
18	11 326	12 268	13 211	14 154	15 096
20	12 310	13 374	14 439	15 503	16 567
22	13 307	14 916	15 683	16 877	18 067
24	14 317	15 645	16 995	18 302	19 630
26	15 340	16 814	18 289	19 764	21 239
28	16 374	18 013	19 651	21 289	22 928
30	17 422	19 232	21 042	22 852	24 662
	Средняя глубина водохранилища $H = 22$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 788	4 031	4 274	4 517	4 760
4	4 739	5 053	5 367	5 682	5 996
6	5 698	6 084	6 469	6 855	7 240
8	6 662	7 127	7 592	8 057	8 522
10	7 634	8 183	8 732	9 281	9 830
12	8 619	9 256	9 892	10 529	11 166
14	9 603	10 332	11 062	11 790	12 520
16	10 601	11 434	12 268	13 102	13 936
18	11 602	12 545	13 488	14 430	15 373
20	12 620	13 684	14 750	15 813	16 877
22	13 651	14 841	16 031	17 221	18 411
24	14 690	16 018	17 347	18 662	20 003
26	15 742	17 217	18 692	20 166	21 641
28	16 806	18 444	20 083	21 721	23 359
30	17 887	19 697	21 507	23 317	25 127
	Средняя глубина водохранилища $H = 24$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 817	4 060	4 303	4 546	4 789
4	4 802	5 116	5 430	5 744	6 059
6	5 790	6 176	6 562	6 947	7 332
8	6 788	7 253	7 718	8 183	8 648
10	7 789	8 338	8 887	9 436	9 936
12	8 803	9 440	10 077	10 714	11 351
14	9 821	10 550	11 279	12 008	12 738
16	10 848	11 682	12 516	13 349	14 183
18	11 883	12 826	13 768	14 711	15 654
20	12 930	13 995	15 059	16 123	17 187
22	13 990	15 180	16 370	17 560	18 750
24	15 063	16 391	17 720	19 048	20 376

t_0 °C	Значения параметра Φ_2 при различной скорости ветра над водоемом ω_2, м/с				
	1	2	3	4	5
26	16 140	17 615	19 090	20 564	22 040
28	17 238	18 876	20 514	22 152	23 790
30	18 348	20 158	21 968	23 778	25 588
	Средняя глубина водохранилища $H = 26$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 838	4 081	4 324	4 567	4 810
4	4 839	5 154	5 468	5 782	6 096
6	5 849	6 235	6 620	7 006	7 391
8	6 867	7 332	7 798	8 263	8 728
10	7 886	8 434	8 993	9 532	10 081
12	8 920	9 557	10 194	10 831	11 468
14	9 960	10 689	11 418	12 147	12 876
16	11 003	11 837	12 670	13 504	14 333
18	12 059	13 002	13 944	14 887	15 830
20	13 127	14 192	15 256	16 320	17 384
22	14 204	15 394	16 584	17 774	18 964
24	15 298	16 626	17 954	19 282	20 611
26	16 400	17 874	19 349	20 824	22 299
28	17 522	19 161	20 799	22 437	24 076
30	18 646	20 456	22 266	24 076	25 886
	Средняя глубина водохранилища $H = 28$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 846	4 089	4 332	4 575	4 818
4	4 860	5 175	5 489	5 803	6 117
6	5 874	6 260	6 645	7 031	7 431
8	6 901	7 366	7 831	8 296	8 761
10	7 932	8 480	9 029	9 578	10 127
12	8 975	9 612	10 249	10 886	11 523
14	10 018	10 748	11 476	12 205	12 905
16	11 074	11 908	12 742	13 576	14 409
18	12 138	13 081	14 024	14 967	15 909
20	13 215	14 280	15 344	16 408	17 472
22	14 306	15 495	16 425	17 874	19 064
24	15 402	16 731	18 059	19 387	20 715
26	16 513	17 988	19 462	20 938	22 412
28	17 640	19 278	20 916	22 555	24 193
30	18 780	20 590	22 400	24 210	26 020
	Средняя глубина водохранилища $H = 30$ м				
0	2 841	3 021	3 201	3 381	3 562
2	3 855	4 098	4 341	4 584	4 827
4	4 877	5 191	5 506	5 820	6 134
6	5 904	6 289	6 675	7 060	7 446
8	6 976	7 404	7 869	8 250	8 799
10	7 978	8 527	9 076	9 624	10 173
12	9 025	9 662	10 299	10 936	11 573
14	10 081	10 810	11 539	12 268	12 997
16	11 145	11 979	12 813	13 647	14 481
18	12 218	13 161	14 104	15 046	15 989
20	13 303	14 368	15 432	16 496	17 560
22	14 401	15 591	16 781	17 971	19 161
24	15 511	16 840	18 168	19 496	20 824
26	16 630	18 105	19 580	21 055	22 530
28	17 766	19 404	21 042	22 680	24 319
30	18 909	20 720	22 530	24 340	26 150

Анализ рядов притока на однород

Водохранилище	Вид притока	Расчетный период	n	$r_{(1)}$	Критерий D	
Чебоксарское	Боковой	1915—80	66	0,225—	0,143+	
Чиркейское	Общий	1925—80	56	0,062—	0,362+	
Бухтарминское	Полезный	1938—80	43	0,313+	0,390+	
Земоавчальское	Общий	1933—80	48	0,223—	0,343+	
Серебрянское	Полезный	1935—80	46	0,170—	0,218+	
Горьковское	Боковой	1915—80	66	0,392+	0,232+	
Шекснинское	Общий	1915—80	66	0,223—	0,274+	
Иваньковское	»	1915—80	66	0,460+	0,189+	
Каневское	Боковой	1896—80	85	0,290+	0,093+	
Кумское	Полезный	1928—80	53	0,129—	0,187+	
Верхнесвирское	»	1932—80	49	0,093—	0,071+	
Красноярское	Боковой	1936—80	45	—0,034—	0,053+	
Зейское	Общий	1901—80	80	0,091—	0,080+	
Орджоникидзевское	»	1925—80	56	0,191—	0,197+	
Дзорагетское	»	1932—80	49	—0,090—	0,094+	
Верхнетуломское	Полезный	1932—80	49	0,034—	0,282+	
Мингечаурское	Общий	1913—80	68	—0,019—	0,153+	
Воткинское	Боковой	1915—80	66	0,581+	0,110+	
Иркутское	Полезный	1933—80	48	0,042—	0,266+	
Рыбинское	Боковой	1915—80	66	0,466+	0,029+	
Нижнекамское	»	1915—80	66	0,501+	0,282+	
Нижнетуломское	»	1932—80	49	0,018—	0,350—	
Нарвское	Общий	1930—80	51	0,550+	0,157+	
Плявиньское	Общий	1930—80	51	0,295+	0,237+	
Саянское	»	1936—80	45	0,016—	0,193+	
Угличское	Боковой	1915—80	66	0,346+	0,256+	
Павловское	Общий	1930—80	51	0,511+	0,201+	
Волжско-Камский каскад	»	1915—80	66	0,460+	0,228+	
Цимлянское	»	1876—80	105	0,110—	0,078+	
Вилюйское	»	1926—80	55	0,456+	0,100+	
Читахевское	»	1933—80	48	—0,042—	0,121+	
Камское	»	1915—80	66	0,367+	0,127+	
Братское	Боковой	1932—80	49	0,209—	0,211+	
Нурекское	Общий	1932—80	49	—0,022—	0,272+	
Куйбышевское	Боковой	1915—80	66	0,377+	0,030+	
Саратовское	»	1915—80	66	0,452+	0,205+	
Каунасское	Общий	1930—80	51	0,169—	0,295+	
Новосибирское	»	1938—80	43	0,040—	0,151+	
Имандровское	Полезный	1926—80	55	0,013—	0,280+	
Волгоградское	Боковой	1915—80	66	0,168—	0,100+	

Примечания: 1. $r_{(1)}$ — коэффициент автокорреляции.
2. Знаки плюс и минус справа от числовых значений показывают подтвер

ность и наличие тренда

однородности		Критерий оценки тренда				
G	R/S	b_1	R	R^2 %	$K-C$	r_s
0,149+	4,42+	0,088+	−0,017+	0,03+	0,64+	−0,059+
0,367+	5,17+	0,613+	0,100+	1,00+	0,540+	0,082+
0,046+	5,04+	−2,363−	−0,297−	8,80−	0,704+	−0,327+
0,458+	4,33+	−0,120+	−0,017+	0,03+	0,250+	−0,015+
0,191+	4,68+	1,417+	0,190+	3,6+	0,936+	0,165+
0,271+	4,49+	−0,011+	−0,002+	0,00+	0,213+	−0,024+
0,389+	4,86+	1,228+	0,236+	5,56+	1,492+	0,184+
0,265+	5,19+	−1,381−	−0,265−	7,03−	2,345−	−0,283−
0,489−	4,40+	−0,313+	−0,077+	0,60+	0,125+	−0,065+
0,027+	4,79+	−0,857+	−0,132+	1.75+	0,793+	−0,083+
0,398+	3,90+	0,925+	0,132+	1,75+	1,155+	0,180+
0,474+	4,04+	−0,281+	−0,037+	0,14+	0,0+	−0,015+
0,387+	4,71+	1,262−	0,293−	8,6−	2,78−	0,324−
0,258+	4,50+	1,424+	0,232+	5,4+	0,077+	0,189+
0,225+	4,35+	0,177+	0,025+	0,06+	0,165+	−0,004+
0,347+	4,42+	0,025+	0,036+	0,00+	0,165+	0,057+
0,099+	4,78+	1,155+	0,228+	5,2+	0,910+	0,239+
0,372+	4,09−	1,696−	0,326−	10,6−	2,34−	0,277−
0,417+	4,51+	−0,820−	−0,395−	15,6−	1,25+	−0,423−
0,311+	3,97−	−0,903+	−0,173+	3,0+	1,066+	−0,170+
0,278+	4,84+	−0,550+	−0,106+	1,11+	0 64+	−0,062+
0,383+	4,99+	0,228+	0,032+	0,11+	0,16+	0,094+
0,210+	4,06+	−1,240+	−0,184+	3,40+	1,46+	−0,170+
0,348+	4,22+	−1,840+	−0,273+	7,5+	0,97+	−0,301−
0,332+	4,14+	−0,884+	−0,116+	1,35+	0+	−0,119+
0,036+	4,48+	−2,024−	−0,388−	1,51−	3,20+	−0,396−
0,240+	4,09+	1,466+	0,218+	4,75+	1,46+	0,246+
0,251+	4,73+	−0,031+	−0,006+	0+	0,64+	0+
					0,68+	−0,247−
0,057+	4,46+					
0,215+	4,20+	−0,418+	−0,067+	0,45+	0,16+	−0,038+
0,484+	4,23+	−0,279+	−0,039+	0,15+	0,25+	−0,066+
0,444+	4,28+	0,370+	0,071+	0,50+	0,21+	0,080+
0,240+	4,44+	−0,680+	−0,097+	0,94+	0,66+	−0,120+
0,285+	5,00+	−0,816+	−0,117+	1,36+	0,16+	−0,187+
0,231+	3,86−	1,245+	0,239+	5,7+	0,21+	0,219+
0,366+	4,31+	−0,949+	−0,182+	3,32+	0,64+	−0,155+
0,201+	4,87+	−2,086−	−0,310−	9,6−	1,46+	−0,314−
0,606−	3,82+	−1,803+	−0,226+	5,13+	0,70+	−0,239+
0,191+	5,49−	−0,204+	−0,033+	0,11+	0,16+	0,011+
0,231+	3,58−	−1,461−	−0,280−	7,9−	1,066+	−0,211+

ждение или неподтверждение гипотезы о стационарности соответственно.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Расчет изменений речного стока под влиянием Кременчугского водохранилища по месяцам и за год

Расчетный параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
						1961 г.							
$(z_в - z_с)$ км³	0	0	0	0	0	0,07	0,23	0,29	0,15	0,06	0,01	0	0,81
b км³	0	0	0,07	—0,01	—0,01	—0,11	0,01	—0,03	0	0,02	0,05	0	0
q км³	0	—0,21	—0,30	0,22	0,23	—0,54	—0,03	—0,03	—0,03	—0,06	0	0	—0,77
c км³	—1,69	—1,71	0,46	3,85	3,71	0,77	—0,79	—0,88	—0,74	—0,56	—0,66	—1,62	0,14
u км³	—1,69	—1,50	0,69	3,64	3,49	1,49	—0,54	—0,53	—0,56	—0,46	—0,70	—1,62	1,72
α	0,84	0,75	0,76	0,78	0,86	0,92	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,92	0,88
						1962 г.							
$(z_в - z_с)$ км³	0	0	0	—0,02	0,05	0,14	0,12	0,15	0,07	0,05	0	0	0,56
b км³	0	0	0,06	—0,04	—0,06	0,01	0,05	—0,05	0,05	—0,04	0,02	0	0
q км³	—0,08	—0,07	—0,03	0,70	0,62	—0,12	—0,01	—0,01	—0,06	—0,02	—0,05	0,16	1,03
c км³	—1,12	—0,97	—1,08	5,19	3,57	—0,22	0,20	—0.39	—0,07	—0,73	—0,07	—0,74	3,57
u км³	—1,04	—0,90	—1,11	4,51	3,06	0,03	0,28	—0,18	0,01	—0,62	—0,04	—0,90	3,10
α	0,89	0,88	0,88	0,72	0,79	0,87	0,89	0,89	0,89	0,91	0,92	0,90	0,87

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Водохранилища полным обьемом 0,1 км³ и более, намеченные к сооружению в бассейнах основных рек СССР в перспективе до 2005 г. (по состоянию на 1988 г.)

Водохранилище	Река	Объем, км³		Площадь зеркала при НПУ, км²
		полный	полезный	
	Бассейн р. Волги			
Иштугановское	Белая	2,8	2,8	83
Суроямское	Уфа	0,2	0,1	24
Долгобродское	»	0,3	0,2	36
Без названия	Пахра	0,1	0,1	16
Ржевское	Волга	1,1	0,9	101
	Бассейн р. Днепр			
Брянское	Десна	0,27	0,22	70
Смоленское	»	0,40	0,10	46
Курское	Сейм	0,10	0,08	31
Без названия	Тускарь	0,10	0,10	32
	Бассейн р. Дон			
Белгородское	Северский Донец	0,12	0,10	23
	Бассейн р. Днестр			
Днестровское	Днестр	3	2	152
	Бассейны рек Терек и Сулак			
Зарамагское	Терек	0,10	0,10	2
Миатлинское	Миатлы	0,10	0,01	1
ГЭС на р. Черек	Черек	0,06	0,04	5
Терско-Малкинское	Терек	0,10	0,09	86
Ирганайское	Аварское Койсу	0,70	0,40	18
Агвалийское	Андийское Койсу	0,4	0,3	6
Зирани	Аварское Койсу	0,01	н. д	4
	Бассейн р. Куры			
Жинвали	Арагва	0,5	0,3	23
Арпачайское	Арпачай	0,15	0,14	6
Шамхорское	Кура	2,7	1,4	116
Ангехакотское	Воротан	0,04	0,01	2
Кечутское	Арпа	0,024	0,004	1
Еникедское	Кура	0,1	н. д	23
Худаферинское	Аракс	2,0	1,7	68
Гыс-Галасинское	»	0,06	0,06	6
Кирзанское	Кура	1,7	1,1	90
Алазанское	Алазань	1,6	1,2	143
Ахалцихское	Кура	0,6	0,5	н. д.
Исмаиллинское	Геокчай	0,1	0,1	н. д.

Водохранилище	Река	Объем, км³		Площадь зеркала при НПУ, км²
		полный	полезный	
	Бассейн р. Урал			
Алтнайское	Кумак	0,9	0,9	57
Янгельское	Урал	0,3	0,1	38
Кувандыкское	Сакмара	0,6	0,6	47
	Бассейн р. Или			
Бестюбинское	Чарын	0,8	0,7	70
	Бассейн р. Сырдарьи			
Курпсайское	Нарын	0,4	0,3	13
Газалкентское	Чирчик	0,02	н. д.	2
Сохское	Сох	0,3	0,3	17
Гавасайское	Гавасай	0,2	0,1	24
Ташкумырское	Нарын	0,3	0,1	8
Камбаратинское	»	4,65	3,43	н. д.
Пскемское	Пскем	0,59	0,5	н. д.
	Бассейн р. Амударьи			
Байпазинское	Вахш	0,1	0,1	5
Шуробское	»	0,05	0,02	9
Сангтудинское	»	1,4	0,1	180
Нижнекафирниганское	Кафиринган	0,91	0,62	н. д.
Даштиджумское	Пяндж	17,6	10,2	н. д.
	Бассейн р. Оби			
Шульбинское	Иртыш	2,4	1,5	255
Крапивинское	Томь	11,7	9,7	670
Семипалатинское	Иртыш	1,1	0,5	170
Верблюжегорское	Чулым	3,0	1,8	250
Кочердыкское	Уч	1,5	1,5	250
Чемальское	Катунь	0,2	0,2	12
Катунское	»	5,8	3,4	87
	Бассейн р. Енисей			
Майнское	Енисей	0,1	0,07	11
Богучанское	Ангара	58,1	2,3	2326
Курейское	Курейка	9,9	7,2	558
Тувинское	Енисей	12,0	7,5	500
Средне-Енисейское	»	74,0	6,2	3866
Осиновское	»	113,5	18,5	5200
Нижне-Ангарское	Ангара	12,0	0,6	243
	Бассейн р. Колымы			
Колымское	Колыма	14,6	6,5	441
Усть-Среднеканское	»	3,2	0,5	181

Водохранилище	Река	Объем, км³		Площадь зеркала при НПУ, км²
		полный	полезный	
	Бассейн р. Лены			
Вилюйское-III	Вилюй	1,1	0,2	104
Мокское	Витим	50,0	20,0	1010
Тельмамское	Мамакан	3,0	1,9	74
	Бассейн р. Амура			
Бурейское	Бурея	22,5	11,5	790
Нижне-Бурейское	»	0,2	0,1	203
Дагмарское	Селемджа	18,5	13,0	1552
Дальнереченское	Большая Уссурка	10,5	2,9	320
Ургальское	Ниман	18,9	7,2	н. д.
Буюндинское	Буюнда	4	2,0	н. д.
	Бассейн Западной Двины			
Даугавпилское	Даугава	0,6	0,3	60

Примечания: 1) представленные в таблице данные нуждаются в уточнении с учетом современных тенденций развития гидроэнергетики; 2) н. д. — нет данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А. Б. Водохранилища и окружающая среда. М.: Изд. об-ва «Знание», 1982. — 48 с.
2. Авакян А. Б., Салтанкин В. П., Шарапов В. А. Водохранилища. — М.: Мысль, 1987. — 325 с.
3. Авакян А. Б., Шарапов В. А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. — М.: Энергия, 1977. — 399 с.
4. Алекин О. А. Гидрохимия рек СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1949. — 138 с.
5. Алмазов А. М. Изменение водного стока Днепра после сооружения водохранилищ и каналов. — В кн.: Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета. М., 1967, с. 256—263.
6. Андреянов В. Г. Усовершенствование методики расчета водного баланса речных водосборов на основе физико-математической модели. — Труды ГГИ, 1977, вып. 241, с. 56—75.
7. Андреянов В. Г., Бабкин В. И. Об увязке водных балансов речных водосборов. — Труды ГГИ, 1972, вып. 200, с. 62—68.
8. Андреянов В. Г., Семенова Г. С. Восстановление естественных характеристик стока зарегулированных рек бассейнов Верхней Волги. — В кн.: Сборник работ Московской ГМО, 1963, вып. 2, с. 4—63.
9. Арманд Д. Л., Герасимов И. П. Экономическое значение и основные принципы использования природных богатств. — В кн.: Природные ресурсы Советского Союза, их использование и воспроизводство. М., 1963, с. 5—10.
10. Бабкин В. И. Испарение с водной поверхности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 80 с.
11. Бабкин В. И., Вуглинский В. С. Водный баланс речных бассейнов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 192 с.
12. Бабкин В. И. и др. Приток воды к водохранилищам крупнейших ГЭС Советского Союза. — В кн.: Тезисы докладов V Всесоюз. гидрол. съезда. Секция озер и водохранилищ. Л., 1986, с. 32—33.
13. Бабкин В. И., Вуглинский В. С., Юдина В. К. Закономерности многолетних колебаний притока в оз. Байкал и его уровня. — В кн.: Гидрология Байкала и других водоемов. Новосибирск, 1984, с. 110—118.
14. Бабкин В. И., Гусев О. А., Новикова В. А. Методика осреднения и интерполяции гидрометеорологических характеристик. — Труды ГГИ, 1974, вып. 217, с. 175—186.
15. Бабкин В. И., Серков Н. К. Моделирование гидрологических характеристик с использованием цепей Маркова. — Метеорология и гидрология, 1974, № 7, с. 55—59.
16. Багров Н. А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. — Труды ЦИП, вып. 74, 1959, с. 3—24.
17. Белых Ф. И. Расчет водообмена Рыбинского водохранилища с окружающим его грунтовым бассейном. — В кн.: Сборник работ Рыбинской ГМО, вып. 2, 1965, с. 3—19.
18. Биндеман Н. Н. Прогноз подпора подземных вод по берегам водохранилищ. Инструкция Гидропроекта.— М.: Госэнергоиздат, 1947.— 37 с.
19. Биндеман Н. Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ.— М.: Углетехиздат, 1951.— 72 с.

20. Благосклонов К. Н., Иноземцев А. А., Тихомиров В. Н. Охрана природы. — М.: Высшая школа, 1967. — 442 с.
21. Богданова Э. Г. Анализ точности определения ветровой поправки к результатам измерения твердых осадков. — Труды ГГО, 1970, вып. 260, с. 24—34.
22. Богословский Б. Б. Водный баланс и термика озер и водохранилищ. Учебное пособие. — Л.: Изд-во ЛПИ им. М. И. Калинина, 1979. — 70 с.
23. Богословский Б. Б., Филь С. А. Классификация водоемов по внешнему водообмену. — В кн.: Географо-гидрологический метод исследования вод суши. Л., 1984. — с. 54—60.
24. Боровкова Т. Н., Никулин П. И., Ясонова З. Н. Куйбышевское водохранилище и влияние его на микроклимат района. — В кн.: Материалы 1-го научно-технического совещания по изучению Куйбышевского водохранилища, вып. 2. Куйбышев, 1963, с. 21—30.
25. Бочевер Ф. М. и др. Основы гидрогеологических расчетов. — М.: Недра, 1969. — 367 с.
26. Бочевер Ф. М., Селюк Е. М. Применение метода ЭГДА для оценки подпора подземных вод и фильтрации в берегах водохранилищ. — М.: Изд. ВНИИВОДГЕО, 1951. — 31 с.
27. Бочков А. П. Об уточнении расчета средних годовых осадков. — Труды ГГИ, 1965, вып. 127, с. 174—187.
28. Браславский А. П. К вопросу о расчете изменения влажности и температуры воздуха при движении воздушного потока над водной поверхностью. — В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. Вып. 1. Алма-Ата, 1963, с. 138—157.
29. Браславский А. П. Исследования и расчеты гидрологического режима озер и водохранилищ. — Дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.09/ГГИ. Алма-Ата, 1965. — 254 с.
30. Браславский А. П. К вопросу о трансформации характеристик воздушной массы при движении ее над водоемом. — Труды КазНИГМИ, 1977, вып. 58, с. 114—117.
31. Браславский А. П. Определение среднего слоя атмосферных осадков, выпадающих на поверхность водоема, по методу универсальной интерполяции. — Труды КазНИИ, 1980, вып. 65, с. 113—118.
32. Браславский А. П. Усовершенствованная формула для расчета испарения с поверхности водных объектов. — В кн.: Труды V Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 8. Л., 1990, 464 с.
33. Браславский А. П., Викулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1954. — 212 с.
34. Браславский А. П., Нургалиев С. Н. Новая формула для расчета испарения с учетом разности температуры воды и воздуха. — В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. Вып. 4. Алма-Ата, 1966, с. 195—206.
35. Браславский А. П., Остроумова Л. П. Новая формула для расчета коэффициента трансформации температуры и влажности воздуха при его движении над водной поверхностью. — Труды КазНИИ, 1985, вып. 91, с. 75—87.
36. Браславский А. П., Струзер Л. Р., Шергина К. Б. Методика определения исправленных величин атмосферных осадков при срочных наблюдениях. — Труды ГГО, 1975, вып. 341, с. 32—50.
37. Браславский А. П. Чистяева С. П. Расчет испарения с поверхности оз. Балхаш по усовершенствованной методике. — Труды КазНИГМИ, 1978, вып. 68, с. 3—44.
38. Браславский А. П., Шергина К. Б. Потери воды на испарение из водохранилищ засушливой зоны Казахстана. — Алма-Ата: Наука, 1965. — 228 с.
39. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1956. — 254 с.
40. Будыко М. И., Зубенок Л. И. Определение испарения с поверхности суши. — Изв. АН СССР. География, 1961, № 6, с. 3—17.

41. Булат В. Г. Исследование стока Днепра и элементов режима Каховского водохранилища применительно к расчетам его водного баланса. — Автореф. дис. ... канд. геогр. наук/Украинский ин-т инженеров водного хозяйства, Ровно, 1975. — 25 с.
42. Буторин Н. В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. — Л.: Наука, 1969. — 322 с.
43. Васильев Ю. С. Влияние плотин и водохранилищ на окружающую среду. Серия: Проектирование и строительство больших плотин. Вып. 7. — М.: Энергоиздат, 1982. — 140 с.
44. Вейнерт В. А., Магдалюк Л. В. Влияние водохранилищ на зарегулированность и изменение речного стока. — Труды координационного совещания по гидротехнике. 1977, вып. 122, с. 104—107.
45. Вендров С. Л. Некоторые аспекты взаимодействия крупных водохранилищ и окружающей среды. — В кн.: Актуальные проблемы управления водными ресурсами и использование водохранилищ. М., 1979. с. 4—13.
46. Вендров С. Л., Дьяконов К. Л. Водохранилища и окружающая среда. — М.: Наука, 1976. — 136 с.
47. Вендров С. Л., Малик Л. К. Опыт определения влияния крупных водохранилищ на местный климат. — Изв. АН СССР, 1964, т. 4, с. 35—46.
48. Веретенникова Г. М., Вуглинский В. С. К оценке потерь речного стока за счет дополнительного испарения с зеркала водохранилищ. — В кн.: Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. Вып. 3. Пермь, 1980, с. 101—106.
49. Веригин Н. Н. О неустановившемся движении грунтовых вод вблизи водохранилищ. — ДАН СССР, 1949, т. 66, № 6, с. 1067—1070.
50. Викулина З. А. Изучение и расчет водного баланса водохранилищ. — Труды ГГИ, 1962, вып. 85, с. 3—16.
51. Викулина З. А. Роль подземных компонентов в водном балансе озер и водохранилищ. — Труды ГГИ, 1977, вып. 240, с. 96—112.
52. Викулина З. А. Водный баланс озер и водохранилищ Советского Союза. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979 — 175 с.
53. Викулина З. А., Натрус А. А. Оценка испарения с поверхности водохранилищ по наблюденным гидрометеорологическим данным. — Труды ГГИ, 1976, вып. 231, с. 3—17.
54. Водохранилища мира. — М.: Наука, 1979. — 287 с.
55. Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1961. — 546 с.
56. Временные указания по введению поправок в месячные суммы осадков при расчете водных балансов речных бассейнов. — Валдай: Изд. ВФ ГГИ, 1967. — 23 с.
57. Вуглинский В. С. К вопросу о методике учета влияния водохранилищ на речной сток. — Труды ГГИ, вып. 274, 1981. с. 73—85.
58. Вуглинский В. С. Определение скорости ветра над водоемом по данным наблюдений береговых метеорологических станций. — В кн.: Сборник работ по гидрологии, № 19, 1987, с. 47—60.
59. Вуглинский В. С. и др. О расчетах многолетних характеристик притока воды к водохранилищам важнейших ГЭС СССР. — Метеорология и гидрология, 1986, № 8, с. 90—93
60. Вуглинский В. С., Завилейский С. В. Методика оценки фильтрационных потерь в береговую зону водохранилищ. — Метеорология и гидрология. 1989, № 6, с. 95—102.
61. Вуглинский В. С., Старовойтова В. К., Черская Е. Н. О методике оценки испарения с поверхности водоема по данным континентального испарителя ГГИ-3000. — Труды ГГИ, 1981, вып. 274, с. 53—72.
62. Гандин Л. С. К вопросу о трансформации профиля ветра. — Труды ГГО, вып. 33, 1952, с. 71—84.
63. Гармонов И. В., Гришина И. Н. Влияние водохранилищ на режим, ресурсы и запасы подземных вод. — В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 8. Л., 1976, с. 237—242.

64. Гармонов И. В., Гришина И. Н., Шестопалов В. М. Методические рекомендации по оценке влияния водохранилищ на ресурсы и запасы подземных вод. — М.: Недра, 1974. — 22 с.
65. Географический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — 432 с.
66. Гета Р. И. Водный баланс Братского водохранилища. — Новосибирск, Наука, 1978. — 134 с.
67. Гета Р. И. Применение теории подобия к расчету испарения с водной поверхности. — В кн.: Методы изучения и расчета водного баланса. Л., 1981, с. 249—265.
68. Голубев В. С. Оценка точности учета осадков осадкомером Третьякова. — Труды ГГИ, 1961, вып. 95, с. 4—13.
69. Голубев В. С. Изучение точности учета атмосферных осадков. — Труды ГГИ, 1969, вып. 176, с. 149—164.
70. Голубев В. С. Методы измерения и расчета испарения с водной поверхности. — В кн.: *Методы изучения и расчета водного баланса.* Л., 1981, — с. 249—265.
71. Голубев В. С., Вуглинский В. С., Кокорева К. М. Методика расчета средней многолетней температуры поверхности воды в водоемах по данным наблюдений водноиспарительной сети. — Труды ГГИ, 1981, вып. 279, с. 75—93.
72. Голубев В. С., Урываев А. П. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов. — Труды ГГИ, 1983, вып. 289, с. 69—76.
73. Гречухина Т. Д. и др. Фонд водохранилищ СССР и его использование. — В кн.: Труды V Всесоюзн. гидрол. съезда. Т. 3. Л., 1989, с. 154—162.
74. Григорьев С. В. О некоторых определениях и показателях в озероведении. — Труды Карельского филиала АН СССР. Материалы по гидрологии (лимнологии) Карелии, 1959, вып. 18, с. 29—45.
75. Гронская Т. П., Знаменский В. А., Москвина Н. Н. Некоторые закономерности зонального распределения составляющих водного баланса озер и водохранилищ земного шара (анализ и практические рекомендации). — Труды ГГИ, 1981, вып. 274, с. 3—9.
76. Давыдов В. К. О коэффициентах редукции для плавучих испарителей. — Труды ГГИ, 1938, вып. 7, с. 44—51.
77. Дмитриев А. А., Соколова И. Н. Схема оценки изменений скорости и профиля ветра при переходе с суши на море. — Труды Морского гидрофиз. ин-та, 1954, № 4, с. 87—93.
78. Емельянов А. Г. Принципы и методика прогноза подтопления берегов водохранилищ. — Труды координационных совещаний по гидротехнике, 1976, вып. 107. с. 161—169.
79. Емельянов А. Г. Натурное моделирование как метод прогнозирования подтопления берегов водохранилищ. — В кн.: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. — Л., 1979, с. 105—113.
80. Жернов И. Е., Шестаков В. М. Моделирование фильтрации подземных вод. — М.: Недра, 1971. — 224 с.
81. Завилейский С. В. Усовершенствование методики расчета подпора подземных вод. — Труды ГГИ, 1984, вып. 300, с. 83—95.
82. Завилейский С. В., Михайлова Г. А., Рудченко Н. Ф. Оценка влияния периода наполнения и режима эксплуатации водохранилищ на развитие подпора подземных вод методом электромоделирования. — Труды ГГИ, 1982, вып. 286, с. 94—121.
83. Завилейский С. В., Суворов А. Н. Электромоделирующее устройство ЭЛИН-ГГИ 78 для расчетов подземного притока. — Труды ГГИ, 1981, вып. 272, с. 78—84.
84. Зайков Б. Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР. — Труды ГГИ, 1949, вып. 21 (75), 54 с.
85. Зайцев А. С. Трансформация поля ветра при изменении турбулентного обмена. — Труды ГГО, 1963, вып. 95, с. 33—41.

86. Зайцев А. С. Трансформация скорости ветра над ограниченными водоемами. — В кн.: Материалы 1-го науч.-техн. совещ. по изучению Куйбышевского водохранилища. Вып. 2. Куйбышев, 1963, с. 53—60.
87. Зайцев А. С., Тимофеев М. П. Изменение скорости ветра под влиянием ограниченных водоемов. — Труды ГГО, 1967, вып. 206, с. 9—13.
88. Кабранова А. И. Водный баланс Выгозерско-Ондского водохранилища. — В кн.: Сборник работ Ленинградской ГМО, 1977, № 11, с. 78—93.
89. Калинин Г. П. Роль водохранилищ в изменении скорости водообмена речных вод. — В кн.: Инженерно-географические проблемы проектирования и эксплуатации крупных равнинных водохранилищ. М., 1972, с. 99—104.
90. Карасев И. Ф. Учет речного стока при отсутствии гидрометрических данных методом разложения функции на естественные ортогональные составляющие. — Труды ГГИ, 1987, вып. 328, с. 3—22.
91. Карауш ев А. В. Внешний водообмен и формирование качества воды в озерах и водохранилищ. — Труды ГГИ, вып. 249, 1978, с. 48—63.
92. Кожевников В. П. О расчете испарения с водоемов с учетом температурной стратификации атмосферы. — Труды ГГИ, 1969, вып. 158, с. 97—105.
93. Колобов Н. В. О влиянии Куйбышевского водохранилища на метеорологические условия и климат в прибрежной зоне. — Изв. ВГО, т. 93, вып. 6, 1961, с. 511—514.
94. Колобов Н. В., Верещагин М. А. О влиянии Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ на метеорологические условия в прибрежной зоне. — В кн.: Материалы 1-го науч.-техн. совещ. по изучению Куйбышевского водохранилища. Вып. 2. Куйбышев, 1963, с. 92—96.
95. Колотиевский А. И. Вопросы теории и методики экономического районирования (в связи с общей теорией экономической географии). — Рига: Знание, 1967, — 246 с.
96. Комар И. В. Превращение природных ресурсов в производительные силы общества. — В кн.: Природа и общество. М.: 1968, с. 181—190.
97. Константинов А. Р. Испарение в природе. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 532 с.
98. Константинов А. Р., Федорова Т. Г., Голубев В. С. Влияние различных факторов на показания водных испарителей, установленных на суше. — Труды ГГИ, 1960, вып. 76, с. 67—111.
99. Коренистов Д. В. Водный баланс р. Волги в связи с сооружением Волжско-Камского каскада гидроузлов. — В кн.: Труды III Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 6. Л., 1952, с. 71—79.
100. Крюков В. Ф. Методика последовательной комплексной регрессии. Расчеты притока воды в озера и водохранилища за различные интервалы времени (на примере водохранилищ Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС).— Труды ГГИ, 1981, вып. 274, с. 22—41.
101. Крюков В. Ф., Литова Т. Э. Расчеты притока воды в оз. Байкал и Верхне-Волжские водохранилища методом последовательной комплексной регрессии. — Труды ГГИ, 1981, вып. 274, с. 42—52.
102. Кузнецов В. И. О переходных коэффициентах наземных испарителей ГГИ-3000. — Труды ГГИ, 1954, вып. 45 (99), с. 142—156.
103. Кузнецов В. И. Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м² по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000. — Труды ГГИ, 1970, вып. 181, с. 3—32.
104. Кузнецов В. И., Голубев В. С. Объективный анализ поля испарения и состояния сети водно-испарительных станций.— Труды ГГИ, 1971, вып. 198, с. 3—33.
105. Макаров А. И., Вейнерт В. А. О классификации водоемов (водохранилищ). — Труды координационного совещания по гидротехнике, 1976, вып. 107, с. 8—11.
106. Матарзин Ю. М., Богословский Б. Б., Мацкевич И. К. Специфика водохранилищ и их морфометрия. — Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1977. — 67 с.
107. Матарзин Ю. М., Богословский Б. Б., Мацкевич И. К. Формирование водохранилищ и их влияние на природу и хозяйство. — Пермь: Изд-во Пермского ун-та. 1981. — 97 с.

108. Материалы междуведомственного совещания по проблеме изучения и обоснования методов расчета испарения с водной поверхности и суши. — Валдай: Изд. ВФ ГГИ, 1966. — 373 с.
109. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 286 с.
110. Методические указания Управления Гидрометслужбы № 89. Составление водных балансов речных бассейнов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. — 96 с.
111. Мещерская А. В. и др. Естественные составляющие метеорологических полей. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 200 с.
112. Минц А. А. Экономическая оценка естественных ресурсов. — М.: Мысль, 1972. — 304 с.
113. Многолетние характеристики притока воды к водохранилищам крупных ГЭС СССР. Государственный водный кадастр. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 64 с.
114. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 7, ч. I. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 476 с.
115. Натрус А. А. К вопросу об оценке осадков как слагаемого водного баланса водохранилищ и озер. — Труды ГГИ, 1964, вып. 113, с. 119—130.
116. Натрус А. А., Мухачева И. А. Уточнение величины осадков применительно к расчету водного баланса озера Байкал. — Труды ГГИ, 1973, вып. 203, с. 34—48.
117. Нежиховский Р. А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — 476 с.
118. Нежиховский Р. А. Методы подсчета притока воды в водохранилище (критический обзор и предложения). — Труды ГГИ, 1972, вып. 197, с. 102—111.
119. Нежиховский Р. А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 192 с.
120. Оценка изменений гидрогеологических условий под влиянием производственной деятельности/Под ред. В. М. Фомина.— М.: Недра, 1978.— 264 с.
121. Перехрест В. С. Влияние водохранилищ на водный баланс и внутригодовое распределение стока р. Днепра. — В кн.: Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Гидрологические проблемы водного хозяйства. Л., 1976, с. 170—176.
122. Пронин А. Г. Особенности водного баланса крупных озер мира в зоне избыточного увлажнения. — Ученые записки Ленинградского ун-та, 1974, № 376, с. 116—125.
123. Разумов Г. А. Подъем уровня подземных вод в прибрежной зоне водохранилищ. — Водные ресурсы, 1984 № 6, с. 41—47.
124. Рекомендации по расчетам водных балансов крупных озер и водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 100 с.
125. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 96 с.
126. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 78 с.
127. Ресурсы поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель. Т. 1. — Л.: Гидрометеоиздат, 1958. — 789 с.
128. Россолимо Л. Л. Очерки по географии внутренних вод СССР. Реки и озера. — М.: Учпедгиз, 1952. — 304 с.
129. Рубан С. Д. Водный баланс Цимлянского водохранилища. — В кн.: Сборник работ Цимлянской ГМО, 1966, вып. 3, с. 13—28.
130. Руденко С. И. Вопросы расчета потерь на испарение при проектировании водохранилищ. — Труды ГГИ, 1941, вып. 11, с. 255—287.
131. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 284 с.
132. Руководство по обработке и подготовке к печати материалов наблюдений на озерах и водохранилищах. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — 252 с.

133. Рымша В. А., Донченко Р. В. Исследование теплопотерь с открытой водной поверхности в зимнее время. — Труды ГГИ, 1958, вып. 65, с. 54—83.
134. Сапожникова С. А. Изменение скорости ветра с высотой в нижнем слое воздуха. — Л.: Гидрометеоиздат, 1946. — 103 с.
135. Саушкин Ю. Г. Введение в экономическую географию. — М.: Изд-во МГУ, 1970. — 339 с.
136. Семенов Е. Ф. Основные гидрологические характеристики крупных водохранилищ юга Европейской части СССР. — Автореф. дис. ... канд. геогр. наук/МГУ, М., 1973. — 30 с.
137. Соколов А. А. Связь водного баланса озер с размерами озера и его бассейна в различных географических условиях. — В кн.: Вопросы гидрологии. М., 1957, с. 195—204.
138. Соколов А. А. О нормах потерь стока, связанных с созданием водохранилищ в различных географических условиях. — Метеорология и гидрология, 1958, № 7, с. 17—21.
139. Срибный М. Ф. Физико-технические проблемы овладения водными ресурсами. — В кн.: Исследование поверхностного и подземного стока. М., 1967. с. 7—25.
140. Струзер Л. Р. Основные недостатки и пути улучшения методов измерения атмосферных осадков. — Труды ГГО, 1965, вып. 175, с. 5—23.
141. Тараканов Г. Г. К вопросу об изменении скорости ветра при переходе с суши на водную поверхность. — Труды ЛГМИ, 1958, вып. 8, с. 113—118.
142. Тервинский В. Н. Формирование ветрового режима над Цимлянским водохранилищем. — Труды ГГО, 1963, вып. 95. с. 47—56.
143. Тервинский В. Н. Методика расчета скорости ветра над водоемами. — В кн.: Сборник работ Цимлянской ГМО, Ростов-на-Дону, вып. 3, с. 91—99.
144. Тимофеев М. П. *О трансформации воздуха над водоемами.* — Метеорология и гидрология, 1955, № 6, с. 26—29.
145. Тимофеев М. П. Метеорологический режим водоемов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1963. — 291 с.
146. Тимофеев М. П. Изменение температуры воздуха под влиянием водоемов. — Труды ГГО, 1963, вып. 95, с. 66—68.
147. Тимофеев М. П. Об изменении скорости ветра под влиянием водоемов. — Труды ГГО, 1963, вып. 95, с. 33—41.
148. Тимофеев М. П. Степенная формула для профиля ветра. — Труды ГГО, 1963, вып. 95, с. 56—59.
149. Указания для гидрометеорологических станций по введению поправок к измеренным величинам атмосферных осадков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 10 с.
150. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 84 с.
151. Фильтрация из водохранилищ и прудов/Под ред. Н. Н. Веригина. — М.: Колос, 1975. — 304 с.
152. Фортунатов М. А. Проблема сооружения водохранилищ и предварительные итоги их учета в различных частях света. — В кн.: Материалы I науч.-техн. совещ. по изуч. Куйбышевского водохранилища. Вып. 1. Куйбышев, 1963, с. 203—211.
153. Фортунатов М. А. *Типизация и группировка водохранилищ различного назначения.* — В кн.: Материалы межвуз. науч. конф. по вопросу изуч. влияния водохранилищ на природу и хозяйство окружающих территорий. Калинин, 1970, с. 8—12.
154. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 304 с.
155. Швер Ц. А. Закономерности распределения количества осадков на континентах. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 285 с.
156. Шикломанов И. А. Антропогенные изменения водности рек. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 302 с.
157. Шикломанов И. А., Веретенникова Г. М. Безвозвратные потери стока р. Волги за счет испарения с водохранилищ Волжско-Камского каскада. — Труды ГГИ, 1973, вып. 206, с. 22—51.

158. Шикломанов И. А., Веретенникова Г. М. Влияние водохранилищ на годовой сток рек СССР. — Труды ГГИ, 1977, вып. 239, с. 27—48.
159. Широков В. М. Конструктивная география рек: основы преобразования и природопользования. — Минск: Изд. Белорусского ун-та, 1985. — 189 с.
160. Штефан В. Н. К расчету водообмена долинного водохранилища. — Вестник Моск. ун-та. Сер. геогр., 1975, № 5, с. 71—75.
161. Штефан В. Н. Водообмен водохранилищ Волжско-Камского каскада. — В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Вып. V. М., 1980, с. 46—55.
162. Штефан В. Н., Эдельштейн К. К. Показатели водообмена водохранилищ. — В кн.: Материалы V Всесоюзн. науч. симпозиума по соврем. пробл. самоочищения и регулирования качества воды. Секция IV, ч. 2. Таллинн, 1975, с. 262—267.
163. Шулейкин В. В. Кинетическая теория испарения. — Журнал Русск. физ.-хим. об-ва. Часть физическая. 1926, т. 8, вып. 3, с. 527—539.
164. Эдельштейн К. К. Морфологическая классификация водохранилищ. — Вестник МГУ, 1977, № 5, с. 96—104.
165. Эдельштейн К. К. Структура водного баланса озер и водохранилищ. — Вестник МГУ, 1978, № 6, с. 3—12.
166. Эдельштейн К. К. Геометрическая модель долинного водохранилища. — В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Вып. V. М., 1980, с. 11—31.
167. Эдельштейн К. К. О соотношении показателей внутреннего водообмена проточных водоемов. — Водные ресурсы, 1981, № 6, с. 70—74.
168. Ackerman E. A. Population and Natural Resources. — In: The Study of Population, Chicago, 1959, p. 621—648.
169. Anderson E. R., Anderson L. I., Marciano I. I. A Review of Evaporation Theory and Development of Instrumentation. — U. S. Navy Electronics Laboratory, Report 159, 1950, 71 p.
170. Dalton I. Experiments and observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by rivers, and raised by evaporation with an inquiry into the origin of springs. — Mem. Lit. Phil. Soc. 5, 1802, p. 346—372.
171. Jarvinen Jukka, Timo Huttula. Estimation of lake evaporation by using different aerodynamical equations. — Geophisica, 1982, 19, N 1, p. 87—99.
172. International Glossary of Hydrology. — WMO, Geneva, Switzerland, 1974, N 385, 393 p.
173. Ficke J. E., Adams D. B. Evaporation from seven reservoirs in the Denver Water-Supply System. — U. S. Geological Survey Water Resources Investigations 76—114, 1977, 170 p.
174. Goldsmith E., Hildyard N. The social and environmental effects of Large Dams. — Sierra Club Books. San Francisco, 1984, 404 p.
175. Horton R. E. Water losses in high latitudes and at high elevation. — Amer. Geoph. Union Trans., 1934, Vol. 15, p. 553—566.
176. Hounam C. E. Comparison between pan and lake evaporation. — World Meteorological Organization. Technical Note 126, 1973, 52 p.
177. Hydrology of Lakes. — Helsinki Symposium, International Association of Hydrological Sciences. Publication 109, 1973, p. 220—224.
178. Lehoczky L. Hydrological studies of the impact of the reservoirs in the Zaguva river basin in Hungary. — Hydrological methods for development and water resources management. Budapest, 1983.
179. Methods of computation of the water balance of large lakes and reservoirs. — UNESCO, 1981, Vol. 1, 120 p.
180. Methods of computation of the water balance of large lakes and reservoirs. — UNESCO, 1984, Vol. 2, 72 p.
181. Millar F. G. Evaporation from free water surfaces. — Canad. Mem., 1937, Vol. 1, N 2.
182. Murota A., Kanda T. Functions of a reservoir on river flow regulation under consideration of reliability of water supply. — Trans. Jap. Soc. Civ. Eng., 1977, N 8.
183. Passarelli, Richard E. Jr., Braham. Role of the winter land breeze in the formation of Great Lake snow storms. — Amer. Met. Soc. Boston, Bulletin, 1984, N 4, p. 482—491.

184. Penman H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. — Proc. Roy. Soc., London, 1948, 193, p. 120—146.
185. Penman H. L. Evaporation: An introduction survey — Netherland J. Agric. Sci., 1956, N 4, p. 9—29.
186. Piper B. S., Plinston D. T., Suttcliffe J. V. The water balance of Lake Victoria. — Hydrol. Sci. J., 1986, Vol. 31, N 1, p. 25—37.
187. Rohwer C. Evaporation from different types of pans. — Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1933, Vol. 59, N 2.
188. Spoehr A. Cultural differences in the interpretation of the natural resources. — In: Man's role in changing the face of the Earth. Chicago, 1965, p. 48—59.
189. Thornthwaite C. W., Holzman B. The determination of evaporation from land and water surfaces. — Monthly Weath. Rev., 1939, 67, p. 4—11.
190. Wilson G. W. Effect of Lake Ontario on precipitation. — Monthly Weather Review, 1977, Vol. 105, N 2, p. 207—214.
191. Winter C. T. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. — Amer. Water Resources Assoc. Water Res. Bull., 1981, Vol. 17, N 1, p. 82—115.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

Часть I. Общие сведения о крупных водохранилищах СССР. Водохранилище и речной бассейн

ГЛАВА 1. КРУПНЫЕ ВОДОХРАНИЛИЩА СССР. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ИХ ВОДООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДОЙ 4

1.1. Общие сведения о крупных водохранилищах СССР 5
1.2. Состояние изученности водообмена крупных водохранилищ с окружающей природной средой 9
1.3. Классификация водохранилищ 15

ГЛАВА 2. ВОДОХРАНИЛИЩЕ И РЕЧНОЙ БАССЕЙН. ОСОБЕННОСТИ ВОДООБМЕНА В СИСТЕМЕ РЕЧНОЙ БАССЕЙН — ВОДОХРАНИЛИЩЕ 19

2.1. Природно-техногенная система речной бассей — водохранилище . . . —
2.2. Основные элементы водообмена в речном бассейне. Водные ресурсы рек в районах интенсивного строительства водохранилищ 21
2.3. Водообмен водохранилища с окружающей природной средой 28
2.4. Уравнения взаимосвязи элементов водообмена в системе водохранилище — речной бассейн 30

Часть II. Водный баланс крупных водохранилищ СССР

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ВОДОХРАНИЛИЩ 33

3.1. Поверхностный приток . . . . . —
3.1.1. Подсчет притока по сумме расходов воды впадающих рек . . . 35
3.1.2. Метод последовательной комплексной регрессии 37
3.1.3. Метод разложения полей на естественные ортогональные составляющие 40
3.1.4. Метод интегрального осреднения функции, описывающей «поверхность» стока 42
3.2. Атмосферные осадки 43
3.2.1. Определение степени соответствия средних значений осадков, полученных по береговым и островным метеостанциям 44
3.3. Подземный водообмен 49
3.3.1. Обоснование выделения характерных периодов формирования подземных вод . . . . . —
3.3.2. Методы оценки составляющих подземного водообмена 55
3.4. Испарение 57
3.4.1. Существующие методы определения испарения . . . . . —
3.4.1.1. Методы, основанные на учете потоков тепла и влаги в приводном слое . . . . . —
3.4.1.2. Расчет испарения по эмпирическим формулам 60
3.4.1.3. Метод испарителей. Современное состояние вопроса об оценке испарения с поверхности воды по данным испарительных установок различных типов 62

3.4.2. *Предлагаемая методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземных испарителей ГГИ-3000* 67
3.5. Методика определения изменения запаса воды в водохранилище . . 75

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ 77

4.1. Предлагаемая методика определения скорости ветра над водоемом 78
4.2. Предлагаемая методика определения среднего значения коэффициента трансформации воздушной массы над водоемом 88
4.3. Методы определения температуры поверхности воды водоема . . . 94
4.3.1. Существующие методы расчета температуры поверхности воды водоема. Учет степени проточности водохранилищ при определении температуры поверхности воды . . . . . —
4.3.2. Предлагаемая методика расчета температуры поверхности воды водоема 104

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАСЧЕТА ВОДНОГО БАЛАНСА И ЕГО УВЯЗКА. ВОДНЫЙ БАЛАНС КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ . . 110

5.1. Существующие способы оценки надежности расчета водного баланса —
5.2. Методика увязки водного баланса 112
5.3. Водный баланс крупных водохранилищ СССР. Анализ погрешностей определения основных элементов баланса 117
5.4. Взаимосвязь элементов водного баланса водохранилищ 123

Часть III. Водные ресурсы водохранилищ СССР

ГЛАВА 6. ПОНЯТИЕ О ВОДНЫХ РЕСУРСАХ ВОДОХРАНИЛИЩ. РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ПРИТОКА В ИХ ФОРМИРОВАНИИ 132

6.1. Общая трактовка понятия «водные ресурсы» . . . . . —
6.2. Предлагаемая трактовка понятия «водные ресурсы» водохранилищ 137
6.3. Особенности суммарного притока воды к водохранилищам 139
6.3.1. Оценка однородности и стационарности рядов годового притока воды к крупным водохранилищам . . . . . —
6.3.2. Вероятности появления группировок лет различной водности и их продолжительность 142

ГЛАВА 7. СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ВОДОХРАНИЛИЩ СССР 146

7.1. Водные ресурсы водохранилищ СССР, их изменение во времени и распределение по территории . . . . . —
7.2. Особенности формирования водных ресурсов водохранилищ. Учет водности притока при регулировании стока водохранилищем 148
7.3. Основные показатели водообмена крупных водохранилищ. Водообмен и качество воды 156
7.4. Перспективная оценка водных ресурсов водохранилищ СССР 161

Часть IV. Влияние водохранилищ на водные ресурсы рек

ГЛАВА 8. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕЧНОЙ СТОК 164

8.1. Методы оценки временных изменений стока при создании водохранилищ 165
8.1.1. Заполнение мертвого объема водохранилищ . . . . . —
8.1.2. Пополнение запасов подземных вод 166
8.1.2.1. Предлагаемая методика оценки объема фильтрационных вод в береговую зону водохранилищ 167
8.2. Методы оценки постоянных изменений стока рек при создании водохранилищ 172

8.2.1. Методика оценки потерь воды с зоны затопления 172
8.2.2. Методика оценки изменений водных ресурсов, связанных с подтоплением прилегающих к водохранилищу земель 176
8.3. Методика оценки изменений речного стока при проектировании водохранилищ 177

ГЛАВА 9. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕЧНОЙ СТОК 181

9.1. Оценка временных изменений речного стока под влиянием водохранилищ . . . . . —
9.2. Оценка постоянных изменений стока рек под влиянием водохранилищ 187

Заключение 190

Приложения 192

Список литературы 212

Монография

ВУГЛИНСКИЙ Валерий Сергеевич

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И ВОДНЫЙ БАЛАНС КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ СССР

Редактор А. Б. Иванова. Художник И. А. Мазур. Художественный редактор Е. Н. Чукаева. Технический редактор Н. И. Перлович. Корректор Л. Б. Емельянова

ИБ № 2024

Сдано в набор 28.12.90. Подписано в печать 04.06.91. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 14. Кр.-отт. 14. Уч.-изд. л. 16,77. Тираж 1510 экз. Индекс ГЛ-66. Заказ № 737. Цена 3 р. 80 к.

Гидрометеоиздат, 199226. Ленинград, ул. Беринга, 38.

Набрано в Ленинградской типографии № 2 головного предприятия ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский пр. 29. Отпечатано в Ленинградской типографии № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.